HENRY DE WOLF SMYTH

LA ENERGÍA ATÓMICA AL SERVICIO DE LA GUERRA



ESPASA-CALPE ARGENTINA, S. A.
BUENOS AIRES - MÉXICO

HENRY DE WOLF SMYTH

PRESIDENTE DEL DEPARTAMENTO DE FÍSICA DE LA UNIVERSIDAD DE PRINCETON
ASESOR DEL CUERPO TÉCNICO DEL DEPARTAMENTO DE MANHATTAN DE LOS E. UNIDOS

LA ENERGÍA ATÓMICA AL SERVICIO DE LA GUERRA

INFORME OFICIAL DEL DESARROLLO DE LA BOMBA ATÓMICA REALIZADO CON EL PATROCINIO DEL GOBIERNO DE LOS ESTADOS UNIDOS DURANTE EL PERÍODO 1940 - 1945

Escrito por pedido del mayor general
L. R. GROVES, U.S.A.

TRADUCCIÓN DE
ANDRÉS LEVIALDI



ESPASA - CALPE ARGENTINA, S. A.
BUENOS AIRES - MÉXICO

Edición especialmente autorizada por el autor

Queda hecho el depósito dispuesto por la ley Nº 11723

Copyright by Cía. Editora Espasa - Calpe Argentina, S. A.
Buenos Aires, 1946

IMPRESO EN ARGENTINA

PRINTED IN ARGENTINE

Acabado de imprimir el 31 de octubre de 1946

Gerónimo J. Pesce y Cía. — Pedro Goyena 1562/68. — Buenos Aires

ÍNDICE GENERAL

PREFACIO

En un mundo agitado por problemas políticos, sociales y económicos, en un ambiente de creciente inquietud como la que ha dominado los espíritus durante estas últimas décadas, pequeños grupos de hombres seguían dedicando sus energías a trabajos de investigación científica.

Si, como muy acertadamente observaba el profesor E. Pérsico en su discurso de inauguración del año académico 1946 de la Universidad de Turín, la importancia de una observación se midiera, como sería lo correcto, por las cosas invisibles que nos revela y no por la importancia de sus efectos, los profanos no habrían mirado con tanto escepticismo el trabajo de los físicos, aparentemente tan alejado de toda aplicación pragmática.

De vez en cuando la curiosidad popular era atraída por el anuncio de noticias sugerentes sobre una novísima rama de la física: la química nuclear. En general el interés, la atención, el estupor no duraban más que un breve instante. Se sabía de la existencia de laboratorios, o más bien, de centros rodeados de misterio donde hombres con aspiraciones excepcionalmente alejadas de la vida normal seguían preocupándose por hechos tan ajenos al mundo como ellos mismos.

Este cuadro es tan conocido que podría parecer superfluo recordarlo si no fuera tal vez interesante agregar que esta postura mental deriva de la vieja concepción de la "ciencia como fin en sí misma", independiente de la vida, que hace concluir

a muchos que la utilización de la ciencia para fines humanos puede degradarla.

Debido en parte a esto, muy pocos llegaban a vislumbrar en la época de crisis mundiales agudas (como la guerra de Etiopía, guerra de España, Munich, Danzig, etc.), que de estos laboratorios podrían surgir hechos decisivos en una escala mundial. La falta de confianza a priori *en ciertos éxitos científicos deriva evidentemente de un insuficiente nivel de cultura, causa y consecuencia de la estructura social actual; el escepticismo en cambio puede resultar, a menudo, de que los progresos científicos se han desarrollado con una penosa lentitud frente a las posibilidades humanas. El resultado fué que ni siquiera los más competentes y, por ende, los más confiados, se atrevían a pensar lo que estaba por ocurrir.*

La noticia escueta que informaba que se había logrado dominar la energía nuclear apareció en forma brusca e implicó una experiencia que, si puede chocar por su finalidad bélica, seguramente no dejó lugar a dudas sobre su contenido. La declaración de un jefe de gobierno, que la siguió, no pudo resultar menos inequívoca.

Mucho se ha hablado y escrito después que la noticia se ha difundido, pero casi nunca los comentarios han sido suficientes para satisfacer la legítima curiosidad del público. El aspecto más singular de estos comentarios es el que deriva del juicio moral sobre la bomba atómica. Parece en efecto extraño aplicar a un adelanto científico atributos psicológicos. Afirmar que la guerra es una actividad repugnante tiene significación precisa, pero aseverar que un medio poderoso de destrucción aunque útil en la guerra es, en sí, inmoral, es hacer una excepción poco comprensible. El atribuir a la bomba atómica misma un significado moral es tan ridículo como afirmar que una ecuación matemática es simpática o triste.

Por otra parte, el interés de este descubrimiento no depende del hecho de que aquellos 200.000 hombres que desaparecieron de golpe, hayan sido japoneses (¡bien habrían podido hallarse las víctimas del otro bando!) Tampoco puede juzgarse su valor por el empleo que se le dió. Sería como afirmar que

es peligroso e inmoral producir altas tensiones so pretexto que los hombres pueden morir fulminados...

El secreto impenetrable ha durado un tiempo suficiente (más o menos cinco años) para que los físicos, que habían vivido desde entonces aislados de las informaciones pudieran tener una idea de lo que había ocurrido o por lo menos de lo qué habría podido ocurrir de realizarse alguna de las últimas hipótesis que acababan de asomarse en el campo de la física nuclear, pero al mismo tiempo, el lapso había sido demasiado prolongado y, sobre todo, durante éste la actividad había sido demasiado intensa para permitirles exposiciones de hechos supuestos sin que interviniera en ellas alguna dosis de fantasía.

El informe del físico H. D. SMYTH *es el primer texto oficial y por consiguiente presenta un extraordinario interés a pesar de las limitaciones todavía impuestas por el secreto.*

Esta empresa por cierto asombra por lo grandioso del plan concebido y por lo trascendental del objetivo alcanzado pero, mirando más de cerca, son otros los aspectos cuya enorme importancia corresponde destacar: por primera vez en la historia un problema de esta magnitud ha sido planteado en forma rigurosamente científica mientras el desarrollo sistemático ha sido orientado por decisiones surgidas de resultados objetivos.

Leyendo este informe se tiene la impresión bien neta de que nunca, durante todo el período, esta orientación fué modificada por elementos irracionales como los que derivan de prejuicios nacionalistas, raciales, etc.

Como todo acontecimiento importante, éste también se debió a una serie de circunstancias y coincidencias en verdad excepcionales. Se dió el caso de que un país sumamente rico en recursos y con una organización industrial muy desarrollada se encontrara de hecho alejado, geográficamente de los ataques directos de la guerra, que la locura de los nazis hiciera posible utilizar los mejores sabios del mundo y que la lucha por la existencia decidiera a buena parte del mundo civilizado a procurar que los que participaban en la empresa tuviesen la tranquilidad y los medios indispensables para trabajar con el máximo provecho.

Una barrera separaba los actores de este gran experimento

del resto del mundo: el secreto más impenetrable. De un lado de la barrera las cosas ocurrían en forma rigurosamente ajustada al imperio de la inteligencia, mientras del otro la lucha contra el nazismo, la lucha por la existencia, imponía otras reglas.

Los Estados Unidos, como es sabido, habían logrado asimilar al país muchísimas de las mejores inteligencias. El rendimiento de esta operación aparecerá bien claro leyendo este informe.

Como decimos, hubo una organización racional de personas y de actividades. Un problema tan complejo obligó a muchos núcleos étnicos de formación, nacionalidad y costumbres distintas a vivir juntos preocupados solamente en alcanzar el éxito final.

Es cierto que este ejemplo admirable de colaboración surgió y fué favorecido por el peligro común, como también que, precisamente en el año 1940, cuando Francia caía bajo los nazis, empezó la más estrecha colaboración entre Inglaterra y Estados Unidos.

Fué entonces cuando el señor Churchill hizo entrega a los Estados Unidos de todos los secretos relacionados con experimentos sobre la bomba atómica en Inglaterra y trató la colaboración de los sabios británicos. Es cierto también que entonces se temía la invasión de Inglaterra y que los nazis estuvieran a punto de producir bombas atómicas. No podemos negar que, cualquiera haya sido la razón que impulsó esta colaboración, ella se hizo efectiva y fué fructífera en sus resultados y nunca encontró obstáculos insuperables en quienes tenían que llevarla adelante día por día, hora por hora.

Personas que han alcanzado cierto grado de civilización y de cultura pueden tener intereses no discordantes y trabajar por un mismo fin: lo que a unos siempre pareció evidente y, cuyo aspecto contrario pareció igualmente evidente a los otros, ha sido definitivamente realizado. Es éste un hecho que nadie puede negar y sobre el cual la discusión se ha hecho casi inútil.

Muchos ejemplos de colaboración internacional se han presentado hasta ahora, pero este último ofrece tan vastas proyecciones que merece ser especialmente puesto de relieve. Sin em-

bargo, podemos considerarlo algo así como una instalación experimental (una "Pilot Plant" para usar la terminología yanqui) de una colosal organización mundial.

Cabe esperar que la lección pueda ser aprovechada y que este experimento no será un hecho aislado. El sentido común indica que no debiere ser necesario volver a pasar por peligros análogos para que los hombres se acuerden de lo que puede lograr una organización regida por la lógica.

El número de los problemas que surgen de esta nueva y gigantesca posibilidad abierta a los hombres parece ser infinito; en la realidad se reduce a uno solo: honradez.

La honradez es en definitiva comprensión y sentido común, y es precisamente el hecho de enfrentarse con un estado de cosas en que éstos no parecen ser favorecidos, lo que más asusta.

Para entenderlo es suficiente leer las reflexiones de uno de los más importantes hombres de ciencia, el doctor HAROLD C. UREY, *que desempeñó un papel muy destacado en la empresa atómica. El doctor* UREY, *en definitiva afirma que vive aterrorizado por lo que los políticos y los diplomáticos pueden hacer con la bomba atómica. Él declara que no se puede poner siquiera en discusión la función de la bomba atómica en una nueva guerra. Su conclusión es muy simple: ahora que la bomba atómica es una realidad no debe haber otra guerra porque todas las viejas concepciones han sido revolucionadas por este moderno dispositivo.*

La guerra no es un mal necesario como se ha repetido hasta la saciedad por parte de muchos. El cuadro espantoso que los más conscientes nos presentan de lo que podrá ser una nueva conflagración mundial tiene que hacer reflexionar a los hombres que hoy rigen los destinos de las naciones.

Aunque no era por cierto necesario llegar a la bomba atómica para entender que el logro de la convivencia entre los hombres no puede plantear problemas cuya solución sólo puede encontrarse en la violencia, esta última, o sea la bomba atómica, pone ante los ojos de todos que, con ella, desde ahora en adelante, la violencia sería la peor locura concebible.

El doctor UREY *subraya que todo hombre debe tener presente que:*

1) *la bomba atómica es extremadamente más destructiva que cualquier bomba anteriormente conocida.*

2) *la bomba atómica probablemente sería empleada como arma de sorpresa.*

3) *quien primero la emplee habrá ganado definitivamente la contienda que tendrá resultados desastrosos en una escala difícilmente imaginable.*

Los hombres deben preocuparse por contar con representantes políticos y militares que tengan una comprensión verdadera de estos problemas. Está en juego la vida de todos. El doctor UREY *se estremece al pensar que los militares, que tanto se prepararon para la guerra anterior, no vean bastante claramente qué revolución militar representa este nuevo explosivo que nace contemporáneamente con otros inventos y adelantos en el campo de la propulsión a chorro y de la radio.*

Bueno es no olvidar que el Japón se declaró vencido cuando sus ejércitos todavía estaban intactos. De haber sido posible que el gobierno japonés escuchara la opinión de sus especialistas en física la simple noticia de que los aliados habían alcanzado este tremendo resultado habría sido suficiente para hacer terminar la contienda. Nunca como ahora es apremiante razonar y ayudar a razonar, entender y ayudar a entender. En 1939 en todos los laboratorios del mundo el tema de la energía nuclear era de la más apasionante actualidad y los físicos ya preveían que de allí saldrían resultados que revolucionarían la civilización. Entonces el desinterés y el escepticismo de los demás hombres era bastante justificado, pero hoy día nadie tiene el derecho de ignorar que en todo instante, en alguna parte del mundo puede decidirse de su propia vida.

Los hombres de ciencia que han participado en la empresa ya saben muy bien que no es posible guardar un secreto que no existe.

De acuerdo con la opinión de la mayoría de los sabios, lo que en los debates públicos y en la prensa llaman el secreto de la bomba atómica es en realidad un conjunto de secretos y no es difícil imaginar de qué clase pueden ser. Por cierto no se trata de perfeccionamiento en los procesos de producción y purificación de los materiales empleados. Probablemente ha de

tratarse de un sinnúmero de pequeños, y no por esto menos importantes, detalles.

Para darnos cuenta de lo que esto pueda significar supongamos que en un país cualquiera una industria, por ejemplo la de la radiotelefonía, haya alcanzado un nivel igual a sus hermanas de las demás partes del mundo, y que luego transcurran veinte años sin que sea renovado ningún procedimiento y sin afectuar ningún adelanto. Supongamos ahora que su dirección técnica se dé cuenta de pronto de esta situación y aspire a alcanzar el nivel de las demás, y que éstas quieran ayudarla. ¿Podemos concebir que se logre la solución comunicándole una simple receta que la infortunada empresa habría desconocido? El sentido común nos dice que el progreso general de una industria, fruto de la labor colectiva, es el resultado de un sinnúmero de pequeñas mejoras. Si fuera necesario dar un ejemplo sería suficiente hechar un vistazo a un simple tubo de rayos X de la General Electric Co. y mirar el número de patentes en él aplicadas. Cada una representa un progreso parcial fruto de años de estudio y de cuidadosas observaciones. Innegablemente hay ideas revolucionarias que pueden transformar completamente una industria o crear una nueva, pero no parece ser el caso de la bomba atómica desde 1940 hasta la actualidad.

La industria atrasada del ejemplo citado podrá recuperar los veinte años perdidos en un tiempo muchísimo menor si tendrá la posibilidad de estudiar y asimilar todos estos detalles, recibiendo una amplia y detallada información, acogiendo hombres de ciencia, nuevos técnicos que estén al día, en su respectiva especialidad, etc.

El caso de la bomba atómica ofrece un ejemplo análogo aunque las condiciones no son las mismas. Sabemos que existían varias industrias atómicas y que en cierta época dos o tres de ellas han unido sus esfuerzos para alcanzar los resultados conocidos. Otras han seguido trabajando por su cuenta. Si el aislamiento impuesto por la guerra persiste, el progreso será lento y la desconfianza aumentará, si en cambio se logra la colaboración que todos desean, las demás industrias que se han quedado un poco atrás podrán ponerse rápidamente al

mismo nivel y colaborar a nuevos problemas que esperan soluciones.

No parece necesario insistir sobre la conveniencia de esta segunda línea de conducta.

Los hombres de ciencia saben que la única forma de sobrevivir es que el dominio del mundo esté en manos de gente honrada. ¿Pero es éste un cuadro catastrófico?

No parece ser así si lo examinamos un poco más a fondo. ¿Cuándo se ha podido justificar razonablemente la existencia, o peor, aún, la utilización de criminales o de naciones organizadas con fines criminales?

Hoy los hombres ven claramente que en la sociedad de la era atómica esto se ha vuelto, si cabe decirlo así, más absurdo todavía.

Saludamos este acontecimiento con satisfacción si este peligro extremo puede hacer razonar a los hombres como ya los hizo obrar en forma sensata.

Si volvemos nuestra mirada hacia un mundo hipotético cuya civilización esté estructurada sobre la base de un aprovechamiento bien adelantado y ramificado de la energía nuclear, difícilmente podríamos resistir a la tentación de describir con todo detalle, como si lo hubiéramos conocido, un mundo surgido de la imaginación de un WELLS. *Probablemente el único resultado sería el de escribir una mala novela para escolares.*

Mientras la descripción de los detalles de un mundo poblado por aviones ultrarrápidos en que se podría por ejemplo vivir en la costa del Mediterráneo y trabajar en Buenos Aires sería, repetimos, un poco ingenua y carente de interés, lo cierto es que el mundo se está empequeñeciendo en la escala de las nuevas posibilidades.

No es por lo tanto, según toda apariencia, insensato pensar que dentro de algún tiempo la diferencia existente por el hecho de haber nacido en Afganistán en lugar de Inglaterra no será muy distinta de la que hoy se establece entre un ciudadano nacido en Buenos Aires frente a otro nacido en La Plata. Lo más importante es que su mentalidad, sus aspiraciones, y sus posibilidades también seguirán un mismo proceso de nivelación.

La posibilidad para la humanidad de contar con una nueva y tan poderosa fuente de energía abre evidentemente un campo prácticamente infinito.

Prescidiendo de las consideraciones ya aparecidas en los periódicos sobre la gran adquisición que significa el contar con una nueva fuente de energía —precisamente cuando una de las más importantes, el carbón, se encuentra en neta disminución—, y sin tener en cuenta todas las divagaciones aparentemente novelescas que los periodistas nos sirven diariamente, no cabe duda que mucho más allá de nuestra capacidad de imaginación, nos espera un mundo cuya estructura se adaptará más y mejor a nuestros gustos y necesidades, y por encima de todo quedará firmemente demostrado que la humanidad tendrá que contar con otros incentivos que el miedo al hambre y a la muerte como factor que impulse hacia una organización de paz y bienestar.

Interesa observar que no está en tela de juicio el hecho de que nos agrade o no el cambio que indiscutiblemente sufrirá el mundo, puesto que por esto no se modificarán, en definitiva, los resultados. La antipatía a la bomba atómica no hubiera logrado nunca impedir su descubrimiento. Más vale aprender a utilizarla y tratar de lograr las condiciones internacionales que lo permitan.

Para que los pasos sucesivos que permitirán la rápida adquisición de nuevos resultados capaces de aumentar el bienestar, puedan realizarse, es necesario que se eleve el nivel científico de todos los países del mundo, lo que permitirá una más vasta colaboración.

No es seguramente posible improvisar en estos campos de actividad, y, como lo hace notar UREY, *los físicos necesitan años de formación en un ambiente apropiado, pero en cambio no hay camino más seguro que lleve a una comprensión recíproca. Los hombres de ciencia tienen necesariamente una visión internacional del problema. Los frutos que están en condiciones de ofrecer al mundo pueden hacerlos salir definitivamente de los tiempos oscuros de la miseria económica que exaspera los ánimos. Con esto, si no se llegará a alcanzar todavía*

la felicidad, por lo menos podrán olvidarse muchos sufrimientos.

DR. ANDRÉS LEVIALDI
De la Universidad Nacional del Litoral

Buenos Aires, 28 de mayo, 1946.

Este libro es una reedición, con las modificaciones detalladas en el prefacio del autor, del informe oficial dado a conocer por el Centro de Técnicos del Departamento Manhattan de Estados Unidos (denominación dada por el Departamento de Guerra al proyecto de la bomba atómica). Ningún derecho o compensación se debe al autor. La publicación ha sido llevada a cabo por la Universidad de Princeton como servicio público con el objeto de tratar de difundir en forma científica y adecuada a estudiantes los resultados de la investigación.

INTRODUCCIÓN

La historia del desarrollo de la bomba atómica debido a los esfuerzos combinados de muchos grupos de colaboradores en los Estados Unidos, es fascinadora, pero es además una narración altamente significativa en el aspecto técnico de una empresa gigantesca. Razones obvias de seguridad militar impiden que esta historia sea hoy relatada en todo detalle. Por otra parte no existe ninguna razón para que las gestiones administrativas relacionadas con el Proyecto de la bomba atómica y los conocimientos científicos fundamentales no sean accesibles al público general. A este fin responde la publicación del presente informe por el profesor H. D. SMYTH.

Toda noticia de carácter científico que actualmente puede ser puesta en conocimiento del público sin violar las normas de la seguridad nacional, está incluída en este volumen. Ningún pedido de informes complementarios directa o indirectamente vinculados con el proyecto, puede ser formulado por particulares u organizaciones. Toda persona que revele o se completa a proporcionar informes complementarios por cualquier medio y en cualquier lugar sin autorización, está sujeta a penalidades severas que corresponden al Acta de espionaje.

El éxito del desarrollo se debe a muchos millares de hombres de ciencia, técnicos, trabajadores y administradores —civiles o militares— que efectuaron un trabajo silencioso y perseve-

rante, y a una total y franca cooperación que hizo posible los resultados técnicos sin precedentes aquí descriptos.

L. R. GROVES
Mayor General U.S.A.

Departamento de Guerra
Wáshington D.C.
Agosto 1945

PREFACIO

La responsabilidad final en lo que a la política de nuestra nación se refiere, incumbe a sus ciudadanos y ellos pueden descargarse conscientemente de esta responsabilidad sólo si están informados. El ciudadano medio no puede tener la pretensión de comprender claramente cómo está construída una bomba atómica y cómo funciona pero existe en este país un grupo conspicuo de técnicos y de hombres de ciencia que pueden entender estas cosas y por ende explicar el poder de las bombas atómicas a sus conciudadanos. El presente informe está escrito para este grupo de profesionales y es en efecto una relación general del trabajo efectuado en los Estados Unidos desde 1939 para obtener la producción de tales bombas. No es ni una historia oficial documentada ni un tratado técnico para expertos. La obligación de no violar el secreto ha afectado tanto el contenido detallado, como la amplitud general, de manera tal que muchos desarrollos interesantes han sido omitidos.

Las referencias al trabajo inglés y canadiense no pretenden ser completas dado que este informe se limita a las actividades en los Estados Unidos.

El autor espera que este relato sea suficientemente preciso y exacto, agradece la colaboración de cuantos se han ocupado

del proyecto; y toma sobre sí la plena responsabilidad de los errores en que pueda haber incurrido.

H. D. SMYTH

1º de julio de 1945.

En esta edición se hicieron cambios de poca importancia. Estos cambios consisten en las siguientes variantes efectuadas en el informe publicado el 12 de agosto de 1945: (1) *Pequeñas aclaraciones y correcciones en la exposición;* (2) *inclusión de un párrafo sobre los efectos radioactivos publicados por el Departamento de Guerra para que acompañara la divulgación original de este informe;* (3) *agregado de algunas frases sobre los resultados de las precauciones para proteger la salud;* (4) *agregado de unos pocos nombres;* (5) *agregado del Apéndice Nº 6, que consigna el texto publicado por el Departamento de Guerra sobre el ensayo efectuado en Nueva México el 16 de julio de 1945;* (6) *inclusión de fotografías; inclusión del índice.*

H. D. SMYTH

1º de septiembre de 1945.

Capítulo I

INTRODUCCIÓN

1.1. La finalidad que se propone este informe es describir los desarrollos científicos y técnicos en Estados Unidos desde el año 1940, dirigidos a la utilización militar de la energía nuclear del átomo. Aunque la exposición del tema no está hecha en forma popular, se ha tratado que este informe sea comprensible para los hombres de ciencia, los técnicos y en general para los demás universitarios con una buena base de física y de química. Hemos elegido la equivalencia entre masa y energía como guía principal en la presentación del material básico de la "Introducción".

LA CONSERVACIÓN DE LA MASA Y DE LA ENERGÍA

1.2. Hay dos principios que han sido las piedras fundamentales de la estructura de la ciencia moderna. El primero —según el cual la materia no puede ser ni creada ni destruída sino sólo alterada en su forma— fué enunciado en el siglo XVIII y es bien conocido por todo estudiante de química. Hoy se lo conoce como ley de la conservación de la masa. El segundo —referente a que la energía no puede ser ni creada ni destruída, sino sólo alterada en la forma— apareció en el siglo XIX y fué siempre la desesperación de los inventores de máquinas de movimiento continuo; es conocido como ley de conservación de la energía.

1.3. Estos dos principios han guiado y disciplinado constantemente el desarrollo y la aplicación de la ciencia. Para

todos los fines prácticos, han quedado inalterados y separados hasta hace más o menos cinco años. Para la mayoría de las aplicaciones todavía siguen así, pero ahora se sabe que son, en realidad, dos aspectos de un solo principio, porque hemos descubierto que la energía puede a veces transformarse en materia y la materia en energía. En particular, esta transformación se observa en el fenómeno de la fisión nuclear del uranio, proceso en que el núcleo atómico se despedaza en fragmentos mientras se produce la liberación de una enorme cantidad de energía. El empleo militar de esta energía ha sido el objeto de las investigaciones y planes de producción que se describen en este informe.

EQUIVALENCIA ENTRE MASA Y ENERGÍA

1.4. Una conclusión que apareció casi desde el principio en el desarrollo de la teoría de la relatividad, fué que la masa inercial de un cuerpo en movimiento aumenta con su velocidad. Este hecho implica una equivalencia entre el aumento de la energía de movimiento de un cuerpo, o sea de su energía cinética, y el aumento de su masa. A la mayoría de los físicos experimentales e ingenieros esto se les presentó como una ficción matemática sin importancia práctica. Ni siquiera Einstein habría podido prever la presente aplicación, pero tan pronto como en 1905 pudo establecer teóricamente en forma clara que energía y masa son equivalentes, sugirió que la prueba de esta equivalencia podría encontrarse en el estudio de las substancias radioactivas. Dedujo la conclusión de que la cantidad de energía E, equivalente a la masa m está dada por la ecuación

$$E = mc^2,$$

donde c es la velocidad de la luz. Si a esto se lo traduce en cifras, aparece su carácter sorprendente. Esto muestra que un kilogramo de materia convertido enteramente en energía, equivale a 25 billones de kilowatt-hora. Esta energía es la que sería generada por la totalidad de la industria eléctrica de los Estados Unidos (tal como existía en el año 1939) si fun-

cionara durante más o menos dos meses. Compárese esta cantidad fantástica con los 8,5 kilowatt-hora de energía térmica que se pueden producir quemando una cantidad igual de carbón.

1.5. Lo extraordinario de tamaña conversión ofreció interés desde muchos puntos de vista. En primer término, esto explicaba por qué la equivalencia entre masa y energía nunca había sido observada en la combustión química ordinaria. Ahora pensamos que el calor producido en una combustión tal contiene una parte de la masa, pero ésta es tan pequeña que no puede ser puesta en evidencia ni siquiera con la más sensible de las balanzas utilizables. (Ésta es del orden de unos pocos billonésimos de gramos por mol).

En segundo lugar, se hizo claro por qué no se convertían en energía cantidades apreciables de materia en ningún proceso común sobre la tierra, pues no se conocían fuentes de energía tan elevada. Además, la posibilidad de iniciar o aprovechar una tal conversión de alguna manera práctica pareció muy remota. Finalmente la magnitud del factor de conversión abría a los filósofos, a los físicos, ingenieros y artistas cómicos un magnífico campo de especulación. Durante 25 años esta especulación careció de prueba experimental directa, pero a comienzos del año 1930 empezó a aparecer y luego a confirmarse en casos cada vez más frecuentes la verdad de lo previsto. Antes de discutir estas pruebas de la conversión parcialmente realizada, de materia en energía, lo que constituye nuestro tema central, echaremos una ojeada a los principios básicos de la física atómica y nuclear. Supondremos cierta familiaridad con la naturaleza atómica de la materia y la existencia de los electrones. Nuestra explicación será un poco más completa que la desarrollada por libros tales como el de POLLARD y DAVIDSON, *Física nuclear aplicada* o *Las partículas de la física moderna*, de STRANATHAN.

RADIOACTIVIDAD Y ESTRUCTURA ATÓMICA

1.6. El fenómeno de la radioactividad, descubierto por H. Becquerel en el año 1896 y estudiado sucesivamente por Pedro

y María Curie, E. Rutherford y muchos otros, constituyó la guía más importante en el descubrimiento de las leyes generales de la estructura atómica y en la comprobación de la equivalencia entre masa y energía.

IONIZACIÓN PRODUCIDA POR SUBSTANCIAS RADIOACTIVAS

1.7. El primer efecto observado en la radioactividad fué el ennegrecimiento de placas fotográficas producido por minerales de uranio. Este efecto es todavía ampliamente empleado en investigaciones sobre radioactividad; la propiedad de las substancias radioactivas de mayor valor científico, es su capacidad de ionizar gases. En condiciones normales, el aire y los otros gases no conducen la electricidad; si así no ocurriera los conductores y las máquinas eléctricas no podrían funcionar al aire libre como lo hacen. Pero en ciertas condiciones, las moléculas del aire se disgregan en fragmentos llamados iones cargados positiva y negativamente. El aire así ionizado puede conducir la electricidad. Unos pocos meses después de haber descubierto la radioactividad, Becquerel comprobó que el uranio ionizaba el aire. Más, precisamente, descubrió que la carga abandonaba rápidamente el electroscopio a través del aire, si se colocaba cerca de éste un pedazo de sal de uranio. (Lo mismo ocurriría a una batería de acumuladores si se colocara una cantidad suficiente de material radioactivo cerca de ésta). Desde entonces, el tiempo de descarga de un electroscopio sirvió para medir la intensidad de la radioactividad. Además, casi todos los instrumentos actuales para el estudio de los fenómenos de la radioactividad dependen, directa o indirectamente, de este efecto de ionización. En el Apéndice I figura una descripción elemental de estos instrumentos, especialmente electroscopios, contadores de Geiger Müller, cámaras de ionización y cámara de niebla de Wilson.

DIFERENTES RADIACIONES O PARTÍCULAS

1.8. El hecho de que distintas substancias radioactivas difieran en su poder ionizante, ya sea en la calidad como en la

intensidad, indica que existen diferencias entre las "radiaciones" emitidas. Algunas de las radiaciones son mucho más penetrantes que otras; por consiguiente, dos muestras radioactivas que producen el mismo efecto sobre un electroscopio no blindado, por ejemplo, si se interponen pantallas entre la muestra y el electroscopio. Se dice que estas pantallas absorben la radiación.

1.9. Estudios sobre absorción y otros fenómenos han mostrado que existen tres tipos de radiación emitida por substancias radioactivas. Hay partículas *alfa,* que son átomos de helio ionizados de alta velocidad (o sea, núcleos de átomos de helio); las partículas *beta,* que son electrones muy veloces; y los rayos *gama,* que son radiaciones electromagnéticas parecidas a los rayos X. De éstas, sólo los rayos gama pueden llamarse con propiedad radiaciones, y aún éstas actúan también de manera muy parecida a las partículas debido a su muy corta longitud de onda. Una tal "partícula" o *quantum* de radiación gama es llamada fotón. En general, los rayos gama son muy penetrantes, mientras que los rayos alfa y beta lo son menos. Aunque los rayos alfa y beta no son muy penetrantes, poseen energías cinéticas enormes por ser partículas de tamaño atómico, energías millares de veces mayores que las energías cinéticas que adquieren las moléculas de un gas debido a la agitación térmica, y millares de veces mayores que los cambios de energía por átomo en las reacciones químicas. Por esta razón Einstein sugirió que el estudio de la radioactividad podría mostrar la equivalencia entre masa y energía.

EL ATOMO

1.10. Antes de considerar qué tipos de átomos emiten rayos alfa, beta y gama, y antes de tratar las leyes que rigen tal emisión, describiremos las ideas corrientes sobre cómo están construídos los átomos, ideas basadas en parte sobre el estudio de la radioactividad.

1.11. De acuerdo con nuestra manera de ver actual, todo átomo está constituído por un pequeño y pesado núcleo de aproximadamente 10^{-12} cm. de diámetro, rodeado por una am-

plia región vacía de 10^{-8} cm de diámetro, en la que se mueven electrones en forma parecida a los planetas alrededor del sol. El núcleo lleva un número entero de cargas positivas, cada una de las cuales es de $1{,}6 . 10^{-19}$ coulombs. (Véase en el Apéndice II una aclaración sobre unidades). Cada electrón lleva una carga negativa del mismo valor y el número de electrones que se mueve alrededor del núcleo es igual al número de cargas positivas del núcleo, de manera que el átomo en su conjunto posee carga nula.

1.12. *Número atómico y estructura electrónica.* El número de cargas positivas que lleva el núcleo se llama número atómico, Z. Éste determina el número de electrones en la estructura extranuclear, y de este número dependen, a su vez, las propiedades químicas del átomo. Así, todos los átomos de un elemento químico dado poseen el mismo número atómico y, recíprocamente, todos los átomos que poseen el mismo número atómico son átomos del mismo elemento, a excepción de posibles diferencias en su estructura nuclear. Los electrones extranucleares se disponen, en un átomo, en capas sucesivas según leyes bien establecidas. El espectro óptico tiene su origen en parturbaciones de la parte exterior de esta estructura electrónica; los rayos X provienen de perturbaciones de los electrones cercanos al núcleo. Las propiedades químicas del átomo dependen de los electrones más alejados y la formación de compuestos químicos es acompañada por pequeños reajustes de estas estructuras electrónicas. Por consiguiente, cuando se obtiene energía por oxidación, combustión, explosión u otros procesos químicos, se obtienen a costa de estas estructuras, de manera que el reajuste de los electrones en los productos del proceso debe producir un cuerpo de contenido energético menor. (Es de suponer que la masa total de estos productos es un poco menor, pero no tal que se pueda poner en evidencia). El núcleo atómico no es afectado por ningún proceso químico.

1.13. *Número de masa.* La carga positiva del núcleo no sólo es siempre igual a un número entero de cargas de electrones (elementales), sino que la masa del núcleo es siempre *aproximadamente* igual a un número entero de veces la uni-

dad fundamental de masa, que es casi la masa de un protón, núcleo del átomo de hidrógeno. (Véase Apéndice II). Este número entero se llama número de masa, A, y es por lo menos dos veces más grande que el número atómico, excepto en los casos del hidrógeno y de un isótopo raro del helio. Como la masa de un protón es más o menos 1.800 veces la de un electrón, la masa del núcleo es casi igual a toda la masa del átomo.

1.14. *Isótopos e isóbaros.* Dos tipos de átomos que poseen el mismo número atómico pero distintos números de masa se llaman isótopos. Son químicamente idénticos y constituyen simplemente dos especies del mismo elemento químico. Si dos tipos de átomos poseen el mismo número de masa y distinto número atómico, se llaman isóbaros y constituyen dos elementos químicos distintos.

RADIOACTIVIDAD Y TRANSFORMACIÓN NUCLEAR

1.15. Si un átomo emite una partícula alfa (cuyo número atómico es 2 y su masa 4), se transforma en un elemento distinto con un número atómico inferior en dos y un número de masa inferior en cuatro. La emisión por parte del núcleo de una partícula beta aumenta el número atómico en uno y deja el número de masa inalterado. En algunos casos estos cambios son acompañados por la emisión de rayos gama. Los elementos que se transforman o ''desintegran'' espontáneamente de estas maneras son inestables y se llaman ''radioactivos''. Los únicos elementos naturales que presentan esta propiedad de emitir partículas alfa o beta son (con muy pocas excepciones), los que poseen números atómicos y de masa muy elevados, tales como el uranio, torio, radio y actinio, esto es, aquellos que se sabe poseen las estructuras nucleares más complejas.

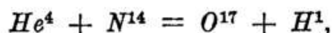
VIDA MEDIA - SERIES RADIOACTIVAS

1.16. Todos los átomos de una serie radioactiva particular presentan la misma probabilidad de desintegrarse en un tiempo dado, y asimismo una muestra de material, que contiene

muchos millones de átomos, se transforma o se "desintegra" siguiendo una misma ley. La ley de transformación del material se expresa en términos de "vida media", o sea el tiempo necesario para que la mitad de los átomos inicialmente presentes se desintegren, y esta vida media es evidentemente igual para cada especie atómica particular. Las vidas medias de los materiales radioactivos varían desde fracciones de segundo, para el más inestable, hasta billones de años, para los que son tan sólo débilmente inestables. A menudo el núcleo, "hijo" de un núcleo "padre" radioactivo, es él mismo radioactivo, y así a través de la línea genealógica de muchas generaciones sucesivas de núcleos hasta alcanzar por fin uno estable. Existen tres familias de esta clase que comprenden en su conjunto alrededor de cuarenta especies radioactivas diferentes. La serie del uranio arranca de un isótopo del uranio, la serie del actinio de otro isótopo del uranio, y la serie del torio, del torio. El producto final de cada serie, después de diez o doce emisiones sucesivas de partículos alfa y beta, es un isótopo estable del plomo.

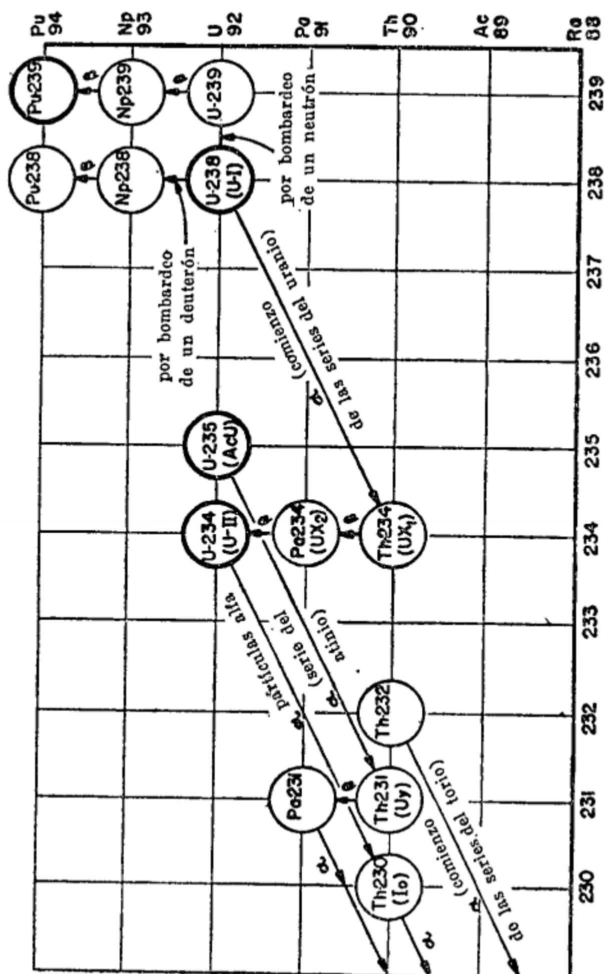
PRIMERA DEMOSTRACIÓN DE LA DESINTEGRACIÓN ARTIFICIAL DEL NÚCLEO

1.17. Antes del año 1919 nadie había logrado alterar la estabilidad de núcleos ordinarios o modificar la ley de desintegración de aquellos que son naturalmente radioactivos. En 1919, Rutherford mostró que partículas alfa de elevada energía pueden provocar una alteración en el núcleo de un elemento ordinario. Esto ocurrió particularmente transformando unos pocos átomos de nitrógeno en átomos de oxígeno mediante el bombardeo con partículas alfa. El proceso que se verificó puede representarse así:



$$He^4 + N^{14} = O^{17} + H^1,$$

que expresa que un núcleo de helio de número de masa cuatro (una partícula alfa) al chocar con un núcleo de nitrógeno de número de masa 14 produce un núcleo de oxígeno de número de masa 17 y un núcleo de hidrógeno de número de masa 1.



Comienzos de tres series naturales radioactivas y los nuevos elementos transuránicos, neptunio y plutonio

El núcleo de hidrógeno, conocido como "protón", es de una importancia particular, puesto que su masa es menor que la de cualquier núcleo. Aunque los protones no aparecen en los procesos radioactivos naturales, existen muchas pruebas directas de que ellos pueden ser expulsados del núcleo.

EL NÚCLEO

1.18. Durante la década que siguió al trabajo de Rutherford, se realizaron muchos experimentos parecidos con resultados similares. Una serie de experimentos de esta naturaleza condujeron al descubrimiento del neutrón, de que trataremos con mayor detalle, porque el neutrón constituye prácticamente el punto fundamental de toda la empresa.

1.19. En el año 1930, W. Bothe y H. Becker descubrieron en Alemania que si partículas alfa emitidas naturalmente por el polonio con elevada energía caen sobre ciertos elementos livianos, en particular berilio, boro o litio, se producía una radiación excepcionalmente penetrante. Al principio se pensó que esta radiación fuese radiación gama, a pesar de que ésta era mucho más que cualquier radiación gama conocida, y que ciertos detalles de los resultados experimentales fuesen muy difíciles de interpretar sobre esta base. La siguiente contribución de importancia fué dada en el año 1932 por Irene Curie y F. Joliot en París. Ellos mostraron que si esta radiación desconocida caía sobre parafina o sobre otro compuesto que contiene hidrógeno, éste emitía protones de muy elevada energía. Considerar la naturaleza de la nueva radiación como radiación gama no era hipótesis absurda, pero un análisis cuantitativo detallado de los datos hacía cada vez más difícil conciliar estos datos con tal hipótesis. Finalmente (en el año 1932) el inglés J. Chadwick realizó una serie de experimentos con los cuales demostró que la hipótesis de los rayos gama era insostenible. Sugirió la existencia de una nueva radiación constituída por partículas sin carga, de masa casi igual a la del protón, y realizó luego una serie de experimentos para verificar su interpretación. Estas partículas sin carga ahora se llaman neutrones.

1.20. La única característica de los neutrones que los dis-

tingue de toda otra partícula subatómica, es la de no poseer carga. Esta propiedad de los neutrones retardó su descubrimiento, los hace muy penetrantes, torna imposible su observación directa, y los convierte en agentes muy importantes en las transformaciones nucleares. Lo confirma el hecho de que un átomo en su estado normal también carece de carga, pero es 10.000 veces más grande que un neutrón y consta de un complicado sistema de electrones cargados negativamente, extremadamente espaciados alrededor de un núcleo cargado positivamente. Las partículas cargadas (como protones, electrones o partículas alfa) y las radiaciones electromagnéticas (como los rayos gama), pierden energía al pasar a través de la materia. Ellas ejercen fuerzas eléctricas que ionizan los átomos del material a través del cual pasan. (Es este proceso de ionización el que hace al aire conductor de la electricidad en el recorrido de las descargas eléctricas y de los relámpagos). La energía empleada en la ionización es igual a la energía perdida por las partículas cargadas que se vuelven más lentas, o por los rayos gama que son absorbidos. El neutrón, en cambio, no es afectado por estas fuerzas; es afectado tan sólo por una fuerza de muy corto radio de acción, esto es, por una fuerza que empieza a actuar cuando el neutrón llega muy cerca del núcleo atómico. Por consiguiente, un neutrón libre sigue su viaje sin ser frenado hasta que "va de cabeza" a chocar con un núcleo atómico. Como el núcleo es muy pequeño, estas colisiones ocurren raras veces y el neutrón recorre un largo camino antes de chocar. En el caso de un choque de tipo "elástico" rigen las leyes ordinarias del impulso exactamente como ocurre en el choque elástico de las bolas de billar. Si el núcleo golpeado es pesado, éste adquiere una velocidad relativamente pequeña, pero si es un protón, cuya masa es aproximadamente igual a la del neutrón, éste es proyectado hacia adelante con una gran fracción de la velocidad primitiva del neutrón, el que a su vez se descelera. Se pueden poner en evidencia los proyectiles resultantes de estas colisiones porque, siendo cargados, producen ionización. La ausencia de carga en el neutrón no sólo hace difícil su detección, sino también su control. Las partículas cargadas pue-

den ser aceleradas, retardadas o desviadas por campos eléctricos o magnéticos que no tienen efecto sobre los neutrones. Por otra parte, no se pueden obtener neutrones libres sino por desintegración; no existen fuentes naturales. El único medio de que disponemos para controlar neutrones libres es el de poner núcleos sobre su camino, de manera que éstos se vuelvan más lentos, sean desviados o absorbidos por choques. Como veremos, estos efectos son de una incalculable importancia práctica.

EL POSITRÓN Y EL DEUTERÓN

1.21. El año 1932 nos trajo no sólo el descubrimiento del neutrón, sino también el del positrón. El positrón fué observado por primera vez por C. D. Anderson en el Instituto de Tecnología de California. Posee la misma masa y el mismo valor absoluto de carga que el electrón, pero la carga es positiva en lugar de ser negativa. Exceptuando el hecho de que se trata de una partícula emitida por un núcleo radioactivo artificial, el positrón tiene poco interés para nosotros.

1.22. El año 1932 señala otro descubrimiento importante. H. C. Urey, F. G. Brickwedde y G. M. Murphy, hallan que el hidrógeno posee un isótopo de masa 2, presente en el hidrógeno natural en la proporción de uno en 5.000. Por su especial importancia, a esta especie de hidrógeno pesado se le ha dado un nombre particular, deuterio, y se ha llamado a su núcleo, deuterón. Como la partícula alfa, el deuterón no es una de las partículas fundamentales, pero puede desempeñar un papel importante en ciertos procesos para producir la desintegración nuclear.

ESTRUCTURA NUCLEAR

1.23. Es muy vieja la idea de que todos los elementos constan de pocas partículas fundamentales. Ahora esto ha quedado firmemente establecido, y creemos que existen tres partículas fundamentales: el neutrón, el protón y el electrón. Una exposición completa exigiría también la discusión del positrón, que hemos nombrado, del neutrino y del mesotrón. El

deuterón y la partícula alfa, de que ya hemos hablado, son importantes partículas complejas.

1.24. Según nuestras concepciones actuales, los núcleos de toda especie atómica están constituídos por neutrones y protones. El número de protones es igual al número atómico, Z. El número de neutrones, N, es igual a la diferencia entre el número de masa y el número atómico, o sea $A - Z$. Hay dos tipos de fuerzas que actúan sobre estas partículas: las fuerzas eléctricas ordinarias, coulombianas, de repulsión entre cargas positivas, y fuerzas de muy corto radio de acción entre todas las partículas. Estas últimas fuerzas son comprendidas sólo parcialmente, y no emprenderemos su discusión. Será suficiente decir que los efectos combinados de estas fuerzas de atracción y de repulsión son tales que sólo ciertas combinaciones de neutrones y protones son estables. Si los neutrones y protones son poco numerosos, la estabilidad se alcanza cuando se hallan en número casi igual. Para núcleos más grandes, la proporción de neutrones requerida para la estabilidad es mayor. Finalmente, en la última parte de la tabla periódica, donde el número de protones es mayor que 90 y el número de neutrones próximo a 150, no hay núcleos perfectamente estables. (Algunos núcleos pesados son casi estables, lo que se manifiesta por poseer una vida media muy larga). Si se forma artificialmente un núcleo inestable agregándole un neutrón o un protón más, puede ocurrir un cambio hacia una forma estable. Esto, cosa rara, no se cumple por emisión de un protón o un neutrón, sino por emisión de un positrón o de un electrón; aparentemente, en el núcleo un protón se transforma en un neutrón y un positrón (o un neutrón se convierte en un protón y un electrón), y es emitida una partícula liviana. En otras palabras, la masa continúa siendo la misma pero el número atómico varía. Las condiciones de estabilidad no son muy críticas, de manera que para cierto valor del número de masa, esto es el número total de neutrones y protones, pueden existir muchas configuraciones estables de neutrones y protones (a lo sumo tres o cinco) que corresponden a varios isóbaros. Para un número atómico dado, es decir, un número determinado de protones, las condiciones pueden va-

riar todavía más ampliamente, de modo que algunos de los elementos pesados pueden poseer hasta diez o doce isótopos estables. Han sido identificados unos 250 núcleos estables, que poseen un número de masa que va desde uno hasta 238 y cuyo número atómico varía desde uno hasta 92.

1.25. Todas las afirmaciones que hemos hecho están basadas sobre la observación experimental. La teoría de las fuerzas nucleares es todavía incompleta, pero ha sido desarrollada sobre la base de los principios de la mecánica cuántica de manera suficiente para explicar no sólo las anteriores observaciones, sino muchos datos empíricos sobre la radioactividad artificial y las diferencias entre núcleos de número de masa par e impar.

RADIOACTIVIDAD ARTIFICIAL

1. 26. Nos hemos referido a la emisión de positrones o electrones por núcleos que tienden a lograr su estabilidad. La emisión de electrones (rayos beta) era ya bien conocida en el estudio de las substancias radioactivas naturales, pero en este caso no había sido encontrada la emisión de protones. En efecto, la discusión general presentada anteriormente, está basada en parte sobre datos que no pueden ser incluídos en este informe. Haremos sin embargo una breve exposición del descubrimiento de la radioactividad "artificial" y de lo que hoy día se sabe de ella.

1.27. En el año 1934, Curie y Joliot comunicaron que ciertos elementos livianos (boro, magnesio, aluminio) que habían sido bombardeados con partículas alfa, seguían emitiendo positrones durante cierto tiempo después que el bombardeo había sido suspendido. En otras palabras, que el bombardeo de partículas alfa producía formas radioactivas de boro, magnesio y aluminio. En aquellas circunstancias, Curie y Joliot midieron vidas medias de 14 minutos, 2,5 minutos y 3,25 minutos, respectivamente, manifestadas por las substancias radioactivas formadas por el bombardeo con partículas alfa.

1.28. Este resultado estimuló experimentos análogos en todo el mundo. En particular, E. Fermi consideró que los neutrones, debido a su falta de carga, tenían que penetrar fácilmente en el núcleo, especialmente cuando éste es de ele-

vado número atómico, y repele violentamente protones y partículas alfa. Pudo verificar su predicción casi inmediatamente, encontrando que el núcleo de un átomo bombardeado captaba el neutrón y que así se producía un núcleo inestable que luego alcanzaba la estabilidad emitiendo un electrón.

1.29. Como resultado de innumerables experimentos llevados a cabo durante el año 1934, ahora pueden producirse isótopos radioactivos de casi todos los elementos de la tabla. Algunos de ellos vuelven a la estabilidad mediante la emisión de positrones, algunos mediante emisión de electrones, algunos mediante un proceso conocido como captación del electrón *K*, que no discutiremos, y un pequeño número (probablemente tres) con emisión de partículas alfa. Aparte de ello han sido observadas más o menos 500 especies nucleares inestables, y en la mayoría de los casos han sido identificados su número atómico y de masa.

1.30. Los elementos radioactivos artificiales no sólo desempeñan un papel importante en la empresa que nos ocupa, sino que revisten un valor incalculable en la medicina del futuro, como reveladores en química y en muchos otros campos de investigación.

CONSIDERACIONES SOBRE LA ENERGÍA

ENERGÍAS NUCLEARES DE COMBINACIÓN

1.31. En la descripción de la radioactividad y de la estructura atómica hemos dejado deliberadamente a un lado todo dato cuantitativo y no hemos recordado ninguna aplicación de la equivalencia entre masa y energía que, como habíamos anunciado, vamos a tomar como principio orientador de este informe. Ahora debemos referirnos a detalles cuantitativos y no solamente a principios puramente generales.

1.32. Hemos hablado de núcleos estables e inestables constituídos por conjuntos de protones y neutrones unidos por fuerzas nucleares. Según un principio general de la física, para sacar de su estado estable a un sistema tiene que aplicársele un trabajo. De modo que, si un conjunto de neutrones

y protones es estable, para separar las partículas que lo componen es necesario proporcionarle energía. Si la energía y la masa son realmente equivalentes, la masa total de un núcleo estable tiene que ser menor que la suma de las masas de los protones y neutrones por separado que han de constituirlo. Esta diferencia de masa tiene que ser, pues, equivalente a la energía necesaria para deshacer completamente el núcleo; ésta se llama energía de combinación. Recuérdese que las masas de todos los núcleos son "aproximadamente" números enteros. Son precisamente las pequeñas diferencias a partir de los números enteros las que tienen importancia.

1.33. Consideremos como ejemplo la partícula alfa. Esta partícula es estable; por ser su número de masa cuatro y su número atómico dos, consta de dos protones y dos neutrones. Como la masa de un protón es 1,00758 y la del neutrón es 1,00893 (véase Apéndice II), la masa total de los componentes por separado del núcleo de helio es

$$2 \times 1{,}00758 + 2 \times 1{,}00893 = 4{,}03302,$$

mientras que la masa del núcleo de helio es 4,00280. Despreciando los dos últimos decimales tenemos 4,033 y 4,003, una diferencia de 0,030 unidades de masa. Ésta, por lo tanto, representa "la energía de combinación" de los protones y neutrones en el núcleo de helio. Parece pequeña, pero si recordamos la ecuación de Einstein, $E = mc^2$, nos damos cuenta de que una pequeña cantidad de masa es equivalente a una gran cantidad de energía. En este caso 0,030 unidades de masa equivalen a $4{,}5 \times 10^{-5}$ ergs para cada núcleo, o sea $2{,}7 \times 10^{19}$ ergs por molécula-gramo de helio. Esto significa, en unidades más familiares al ingeniero y al químico, que la ruptura de los núcleos de todos los átomos de helio contenidos en un gramo necesita $1{,}62 \times 10^{11}$ grandes calorías, o sea 190.000 kilowatt-horas de energía. Inversamente, si protones y neutrones libres pudiesen ser unidos para formar núcleos de helio, esta misma energía sería liberada.

1.34. Evidentemente vale la pena investigar la posibilidad de obtener energía combinando protones y neutrones o transmutando una clase de núcleos en otra. Empecemos por revi-

sar los conocimientos actuales sobre la energía de combinación de distintos núcleos.

ESPECTROS DE MASA Y ENERGÍA DE COMBINACIÓN

1.35. Las determinaciones químicas del peso atómico proporcionan el peso medio de un gran número de átomos de un elemento dado. A menos que el elemento posea un solo isótopo, el peso atómico químico no es proporcional a la masa de los átomos individuales. El espectrógrafo de masa perfeccionado por F. W. Aston y otros, partiendo del primer aparato de J. J. Thomson, mide las masas de los distintos isótopos. En efecto, fueron precisamente tales mediciones las que permitieron comprobar la existencia de isótopos y mostraron que en la escala del peso atómico las masas de todas las especies atómicas eran muy próximas a números enteros. Estos números enteros, descubiertos experimentalmente, son los números de masa que ya hemos definido y que representan las sumas de los números de protones y neutrones; su descubrimiento contribuyó en gran parte a formar nuestra actual concepción de que todos los núcleos son combinaciones de neutrones y protones.

1.36. Datos espectrográficos perfeccionados, complementados en pocos casos por resultados de reacciones nucleares, han proporcionado números exactos sobre las energías de combinación en muchas especies atómicas en toda la serie de las masas atómicas. Esta energía de combinación, B, es igual a la diferencia entre la masa nuclear verdadera M, y las sumas de las masas de todos los protones y neutrones en el núcleo. Esto es,

$$B = (ZM_p + NM_n) - M,$$

donde M_p y M_n son las masas de los protones y de los neutrones respectivamente, Z es el número de protones, $N = A - Z$ es el número de neutrones, y M la verdadera masa del núcleo. Presenta mayor interés estudiar la energía de combinación por partícula, o sea más bien B/A que B misma. Tal estudio muestra que, exceptuando ciertas fluctuaciones en los núcleos

livianos, la tendencia general de la energía de combinación por partícula aumenta rápidamente hasta un máximo alrededor de $A = 60$ (níquel) y luego decrece gradualmente otra vez. Evidentemente, los núcleos de la parte central de la tabla periódica —núcleos de número de masa entre 40 y 100— son los más fuertemente vinculados. Toda reacción nuclear en la que las partículas del núcleo resultante están más fuertemente vinculadas que en el núcleo inicial, libera energía. Hablando en términos termoquímicos, tales reacciones son exotérmicas. Así que, en general, se puede obtener energía combinando núcleos livianos para formar núcleos más pesados, o bien partiendo núcleos muy pesados en dos o tres fragmentos más pequeños. Además, existe cierto número de casos especiales de desintegraciones nucleares exotérmicas que se encuentran en los primeros diez o doce elementos de la tabla periódica donde la energía de combinación por partícula varía irregularmente de un elemento a otro.

1.37. Hasta ahora puede parecer que no hemos hecho sino presentar un encadenamiento de hipótesis. Primero hemos supuesto que masa y energía son equivalentes; ahora afirmamos que el núcleo atómico puede ser reajustado con una consiguiente reducción de su masa total, liberando a causa de esto la energía que se encuentra así disponible. Ha llegado el momento de hablar de algún experimento que haya convencido a los físicos de que estas afirmaciones eran ciertas.

COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE LA EQUIVALENCIA ENTRE MASA Y ENERGÍA

1.38. Como ya hemos dicho, el trabajo de Rutherford del año 1919 sobre desintegración artificial fué seguido por muchos otros experimentos similares. El progreso gradual en la técnica del más alto voltaje hizo posible substituir iones a las partículas alfa de hidrógeno o de helio de alta velocidad producidos artificialmente. J. D. Cockcroft y E. T. S. Walton en el laboratorio de Rutherford lograron por primera vez transmutaciones nucleares con estos métodos. En el año 1932 bombardearon una pantalla de litio con protones de 700 kilovoltios de energía y hallaron que, a consecuencia del bom-

bardeo, la pantalla emitía partículas alfa. La reacción nuclear que se produjo puede representarse simbólicamente así:



$$_3Li^7 + {}_1H^1 = {}_2He^4 + {}_2He^4$$

donde el subíndice representa la carga positiva del núcleo (número atómico) y el índice superior el número de partículas con masa presentes en el núcleo (número de masas). Como en las ecuaciones químicas, las cantidades de la izquierda deben ser iguales a las de la derecha: así, por ejemplo, la suma de los subíndices vale cuatro y la suma de los índices superiores vale ocho de un lado y de otro de la ecuación

1.39. Ni la masa ni la energía figuran en esta ecuación. En general, el protón incidente y las partículas alfa resultantes tendrán su propia energía cinética particular. De la misma manera, la masa de dos partículas alfa no será exactamente igual a la suma de las masas de un protón más un átomo litio. De acuerdo con nuestra teoría, los totales de masa más energía tomados juntos tienen que ser iguales antes y después de la reacción. Las masas son conocidas por los espectros de masa. A la izquierda ($Li^7 + H^1$) tenían un valor igual a 8,0241, a la derecha ($_2He^4$) 8,0056, así que 0,0185 unidades de masa han desaparecido en la reacción. La energía de las partículas alfa, determinadas experimentalmente, resultó ser aproximadamente 8,5 millones de electrón voltios para cada una, valor que, comparado con la energía cinética del protón incidente, hace esta última despreciable. En conclusión, han desaparecido 0,0185 unidades de masa y 17 mev de energía cinética han aparecido. Siendo 0,0185 unidades de masa equivalentes a 3,07. 10^{-26} gramos, 17 mev equivalentes a $27{,}2 \times 10^{-6}$ ergs y c igual a 3×10^{-10} cm/seg (Véase Apéndice 2), si substituímos estos valores en la ecuación de Einstein, $E = m\,c^2$, a la izquierda tenemos $27{,}2 \times 10^{-6}$ ergs y a la derecha $27{,}6 \times 10^{-6}$ ergs, de modo que se encontró que la ecuación se verificaba con buena aproximación. En otras palabras, estos resultados experimentales prueban que la equivalencia entre masa y energía había sido correctamente establecida por Einstein.

REACCIONES NUCLEARES

MÉTODO DE BOMBARDEO NUCLEAR

1.40. Cockcroft y Walton produjeron protones de energía suficientemente elevada ionizando hidrógeno gaseoso y acelerando luego los iones en un dispositivo transformador-rectificador de alto voltaje. Un procedimiento parecido puede emplearse para producir deuterones de energía elevada partiendo del deuterio, o partículas alfa de alta energía del helio. Se pueden alcanzar energías más elevadas acelerando los iones en el ciclotrón o en la máquina de Van de Graaf. Sin embargo, para conseguir radiaciones gama de alta energía o —lo más importante de todo— para conseguir neutrones, es necesario recurrir a reacciones nucleares que sirvan ellas mismas como fuente. De ciertos materiales radioactivos naturales o de cierto tipo de bombardeo provienen radiaciones de energía suficientemente elevada. Comúnmente los neutrones son producidos bombardeando ciertos elementos como el berilio y el boro, mediante partículas alfa, o mediante protones o deuterones si se emplean pantallas adecuadas. La fuente más común de neutrones es una mezcla de radio y berilio en la cual las partículas alfa emitidas por el radio y sus productos de desintegración penetran en el núcleo Be^9, el que emite neutrones transformándose en un núcleo estable de C^{12} (carbono ordinario). Una fuente de neutrones empleada a menudo consiste de deuterones acelerados que bombardean "agua pesada" helada. En este caso los deuterones de alta velocidad golpean los deuterones de la pantalla y producen neutrones y núcleos de He^3. Se emplea además una media docena de otras reacciones utilizando pantallas de deuterio, litio, berilio y boro. Obsérvese que en todas estas reacciones el número de masa total y el número de carga total no varían.

1.41. En conclusión, los agentes conocidos para iniciar reacciones nucleares son, en orden aproximado de importancia: los neutrones, deuterones, protones, partículas alfa, rayos gama y raras veces partículas más pesadas.

CONSECUENCIAS DEL BOMBARDEO NUCLEAR

1.42. Muchos núcleos atómicos pueden ser penetrados por una clase, por lo menos, de proyectiles atómicos (o por rayos gama). Toda penetración de esta índole puede provocar un reajuste nuclear acompañado por la expulsión de una partícula fundamental o la emisión de una radiación, o las dos cosas a la vez. El núcleo resultante puede ser uno de los tipos estables que se encuentran en la naturaleza, o, más a menudo, puede ser un átomo de un tipo diferente, radioactivo, que eventualmente se transforma aún en un núcleo distinto. Éste a su vez puede ser radioactivo y, en tal caso, desintegrarse nuevamente. El proceso sigue hasta que todos los núcleos se han transformado en un tipo estable. Las substancias radioactivas artificiales difieren de las naturales por dos razones: Muchas se desintegran emitiendo positrones (desconocidos en la radioactividad natural) y muy pocas emiten partículas alfa. En todos los casos en que fueron efectuadas mediciones cuidadosas se comprobó la equivalencia entre masa y energía y una y otra quedaron constantes (A veces es necesario recurrir al neutrino para salvar la conservación de la masa y de la energía).

NOTACIONES

1.43. Una descripción completa de una reacción nuclear debería incluir la naturaleza, la masa y energía de la partícula incidente, así como la naturaleza (número atómico y de masa), masa y energía (en general cero) de la partícula blanco, como también la naturaleza, masa y energía de las partículas (o radiación) expulsadas, y por último la naturaleza, masa y energía del residuo. Pero sólo raras veces se los conoce todos, y para muchos fines no es necesaria su determinación completa. A menudo una reacción nuclear es descripta por una notación que indica primero el blanco mediante su símbolo químico, su número de masa, si es conocido, luego el proyectil, después de la partícula emitida y por último el residuo. En este esquema el neutrón es representado por la letra n, el protón por p, el deuterón por d, la partícula alfa por α, y los gama por γ. Así la reacción radio-berilio para producir neu-

trones se escribe Be^2 (α, n) C^{12} y la reacción deuterón-deuterón H^2 (d, n) He^3.

TIPOS DE REACCIONES

1.44. Si consideramos las cinco partículas diferentes (n, p, d, α, γ) tanto como proyectiles cuanto como productos emitidos, podemos esperar encontrar veinticinco combinaciones posibles. Ahora bien, muy raras veces se encuentra el deuterón como partícula emitida, y el fotón produce sólo dos tipos de reacciones. Sin embargo existen algunos otros tipos de reacciones, como $(n, 2n)$, (d, H^3), y la fisión que elevan el número total de tipos conocidos a más o menos veinticinco. Tal vez tendría que recordarse en particular la reacción (n, γ) por ser muy importante en un proceso que nos va a interesar. A menudo se la llama "captación radiante" porque el neutrón queda en el núcleo y sólo sale de él una radiación γ.

PROBABILIDAD Y "SECCION EFICAZ"

1.45. Hasta aquí nada se ha dicho acerca de la probabilidad de las reacciones nucleares. Ésta puede variar mucho. No hay ninguna garantía de que un neutrón o un protón dirigidos sobre un núcleo penetren en él. Esto depende del núcleo y de la partícula incidente. En física nuclear se ha encontrado conveniente expresar la probabilidad de un acontecimiento particular mediante una "sección eficaz". Desde el punto de vista estadístico, los centros de los átomos en una hoja delgada pueden ser considerados como puntos uniformemente distribuídos sobre un plano. El centro de un proyectil atómico que alcanza este plano posee geométricamente una probabilidad finita de pasar a una cierta distancia (r) de uno de estos puntos. En efecto, si en el área A del plano hay n centros atómicos, esta probabilidad es $n \pi r^2/A$, que es simplemente la relación entre el conjunto de las áreas constituídas por los círculos de radio r dibujados alrededor de los puntos y el área total. Si concebimos los átomos como discos impenetrables de acero y la partícula incidente como una bala de diámetro despreciable, esta relación representa la probabilidad

de que la bala pegue sobre el disco de acero, o sea, que el proyectil atómico sea detenido por la hoja. Si de los átomos que chocan se quiere medir la fracción que *atraviesa* la hoja, el resultado puede todavía expresarse en términos de la "sección eficaz" equivalente de los átomos que la detiene.

Esta noción puede extenderse a toda interacción entre partículas que chocan y átomos del blanco. Por ejemplo, la probabilidad de que una partícula alfa que llega sobre un blanco de berilio produzca neutrones, puede expresarse como sección eficaz equivalente del berilio para este tipo de reacción.

1.46. En física nuclear existe la convención de considerar que las partículas empleadas para bombardear poseen un diámetro despreciable. La definición técnica de la sección eficaz para cualquier proceso nuclear es, por lo tanto:

$$\frac{\textit{número de procesos que se producen}}{\textit{número de partículas incidentes}} = \textit{(número de núcleos del blanco por } cm^2\textit{)} \times \textit{(sección eficaz nuclear en } cm^2\textit{)}$$

Cabe observar que esta definición está dada para la sección eficaz por núcleo. Las secciones eficaces pueden ser computadas en toda clase de procesos tales como choque inelástico, producción de neutrones, etc. En muchos casos el número de partículas emitidas o difractadas en un roceso nuclear no es medido directamente; solamente se mide la atenuación que se produce en un haz paralelo de partículas incidentes mediante la interposición de espesores conocidos de un material particular. La sección eficaz obtenida de esta manera se llama sección eficaz total y se la acostumbra indicar mediante *o*.

1.47. Como se indicó en el párrafo 1.11., el diámetro nuclear tipo es del orden de 10^{-12} cm. Podríamos esperar por lo tanto que las secciones eficaces en las reacciones nucleares sean del orden de $\pi d^2/4$, o sea aproximadamente 10^{-24} cm², y ésta es la unidad en que usualmente se expresan. Las secciones eficaces observadas varían enormemente. Así, por ejemplo, para los neutrones lentos absorbidos en la reacción $(n\,\gamma)$ la sección eficaz en algunos casos vale 1000×10^{-24} cm², mientras las secciones eficaces en las trasmutaciones por absorción de rayos gama valen más o menos $(1/1.000) \times 10^{-24}$ cm².

POSIBILIDADES DE APLICACIÓN DE LA ENERGÍA ATÓMICA EN EL AÑO 1939

EXPERIMENTOS EN PEQUEÑA ESCALA

1.48. Hemos hablado sin dificultad de la equivalencia entre masa y energía y de reacciones nucleares tales como la de protones con litio, en la cual la energía era liberada en cantidades relativamente grandes. Ahora preguntémonos por qué no surgieron en todo el mundo instalaciones de energía atómica en la década siguiente. Después de todo, si podemos lograr $2{,}76 \times 10^{-5}$ ergs de un átomo de litio bombardeado por un protón, podemos esperar obtener aproximadamente un medio millón de kilowatt-hora combinando un gramo de hidrógeno con siete gramos de litio. Parece mejor que quemar carbón. Las dificultades residen en producir protones de velocidad elevada y en controlar la energía producida. Todos los experimentos de que hemos hablado han sido hechos con cantidades extremadamente pequeñas de material, suficientemente grandes en número de átomos, seguramente, pero infinitesimales si se las expresa en términos de cantidades de masa usuales: no toneladas, onzas o gramos, sino fracciones de microgramos. La cantidad de energía empleada en los experimentos fué siempre muchísimo mayor que la cantidad generada por la reacción nuclear.

1.49. Los neutrones son particularmente eficaces para producir desintegraciones nucleares. ¿Por qué éstos no han sido empleados? Si su fuente inicial era un haz de iones incidente sobre una pantalla, había que aplicar las limitaciones discutidas en el último párrafo. De emplearse una fuente de radioberilio, la escasez del radio constituía una dificultad.

NECESIDAD DE UNA REACCIÓN EN CADENA

1.50. Nuestras fuentes energéticas comunes aparte de la luz solar y el poder hidráulico; son reacciones químicas —generalmente la combustión de carbón o de petróleo—. Ellos

liberan energía como resultado de un reajuste de la estructura electrónica exterior de los átomos, la misma clase de proceso que proporciona energía a nuestro cuerpo. La combustión siempre se propaga por sí misma; así que encendiendo un fuego con un fósforo, éste emite suficiente calor como para quemar el combustible cercano, el cual a su vez libera más calor, el cual quema más combustible, continuando así el proceso. En las reacciones nucleares que hemos descripto, esto en general no es cierto; ni la energía liberada ni las nuevas partículas formadas son suficientes para mantener la reacción. Pero podemos imaginar reacciones nucleares que emiten partículas de la misma clase de las que las iniciaron y en número suficiente como para propagar la reacción a los núcleos cercanos. Una tal reacción, que se propague por sí misma se llama "reacción en cadena", y estas condiciones deben ser alcanzadas si la energía de las reacciones nucleares que tratamos han de emplearse en gran escala.

PERÍODO ESPECULATIVO

1.51. Aunque no se construyeron plantas de energía atómica en la década que va de 1930 a 1940 hubo una cantidad de descubrimientos y de ensayos en física nuclear. H. Bethe propuso una teoría para explicar el calor del sol por medio de un ciclo de cambios nucleares en que tomaban parte carbono, hidrógeno, nitrógeno y oxígeno y que tal vez llevaban a la formación del helio (*).

(*) La serie de reacciones propuestas era:

1.) ${}_6C^{12} + {}_1H^1 — {}_7N^{13}$
2.) ${}_7N^{13} — {}_6C^{13} + {}_1e^0$
3.) ${}_6C^{13} + {}_1H^1 — {}_7N^{14}$
4.) ${}_7N^{14} + {}_1H^1 — {}_8O^{15}$
5.) ${}_8O^{15} — {}_7N^{15} + {}_1e^0$
6.) ${}_7N^{15} + {}_1H^1 — {}_6C^{12} + {}_2He^4$

El resultado final es la transformación de hidrógeno en helio y positrones (indicados con ${}_1e^0$) y la liberación de unos treinta millones de electrónvoltios de energía.

Esta teoría es ahora generalmente aceptada. El descubrimiento de algunas reacciones nucleares $(n, 2n)$, (esto es, reacciones que son producidas por y producen neutrones) sugirió que una reacción en cadena auto-multiplicadora puede ser iniciada bajo condiciones adecuadas. Se habló mucho de energía atómica y un poco de bombas atómicas. Pero el último gran paso de este período preliminar fué dado sólo después de cuatro años de tanteos. Los efectos de bombardeo del uranio con neutrones, el elemento más complejo conocido, han sido estudiados por algunos de los físicos más capaces. Los resultados fueron grandiosos pero confusos. La historia de su paulatina interpretación es complicada y altamente especializada, un cuento fascinador de teoría y de experimentos. Pasando por alto las primeras explicaciones inadecuadas, vamos directamente a la explicación final, que, como a menudo ocurre, es relativamente sencilla.

DESCUBRIMIENTO DE LA FISIÓN DEL URANIO

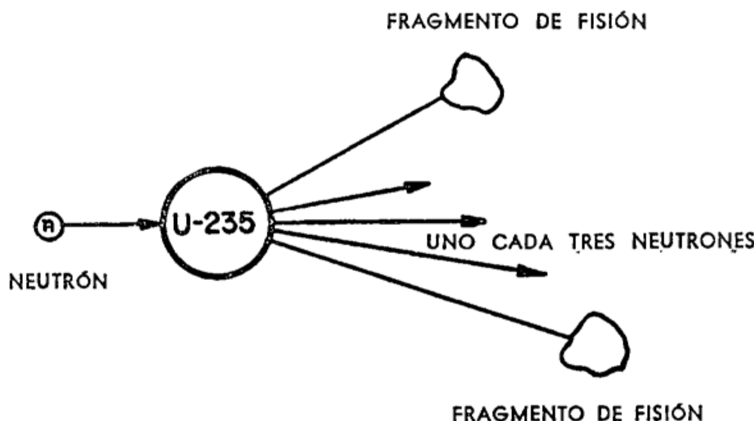
1.52. Como ya hemos dicho, se comprobó que el neutrón es la partícula más eficiente para producir trasmutaciones nucleares. Esto es particularmente cierto para los elementos de mayor número y peso atómicos en que la carga nuclear ejerce una intensa fuerza repulsiva sobre proyectiles como el deuterón o el protón, pero no sobre los neutrones desprovistos de cargas. Los resultados del bombardeo de uranio con neutrones lo han comprobado de una manera interesante e intrincada. Estudiado este hecho por primera vez por Fermi y sus colegas en el año 1934, no pudo ser interpretado acabadamente hasta muchos años después.

1.53. El 16 de enero de 1939, Niels Bohr de Copenhague, Dinamarca, llegó a Estados Unidos de Norte América y pasó muchos meses en Princeton, N. J., ocupándose particularmente en discutir algunos problemas teóricos con Einstein. (Cuatro años después Bohr tuvo que escaparse de la ocupación nazi de Dinamarca en un pequeño bote). Justamente antes de que Bohr dejara Dinamarca, dos de sus colegas, O. R. Frisch y L. Meitner (ambos refugiados alemanes) le habían expuesto su

presunción de que la absorción de un neutrón por un núcleo de uranio a veces tuviera como consecuencia la fractura del núcleo en dos partes aproximadamente iguales, fenómeno que libera enormes cantidades de energía; este proceso fué denominado en seguida "fisión nuclear". La oportunidad para estas hipótesis fué proporcionada por el importante descubrimiento de O. Hahn y F. Strassmann en Alemania (publicado en *Naturwissenchaften* a principios de enero de 1939) que comprobó que un isótopo del bario era producido bombardeando el uranio con neutrones. Inmediatamente después de su llegada a los Estados Unidos, Bohr comunicó esta idea a J. A. Wheeler, ex alumno suyo, y a otros en Princeton, y desde allí la novedad se difundió verbalmente a los físicos cercanos incluyendo a Enrique Fermi de la Universidad de Columbia. Como resultado de las conversaciones entre Fermi, J. R. Dunning y G. B. Pegram se dió comienzo a una investigación en Columbia sobre los intensos efectos de ionización que había que esperar debido a la proyección de los fragmentos del núcleo de uranio. El 26 de enero de 1939 se realizó una conferencia de física teórica en Wáshington, D. C., patrocinada por la Universidad George Wáshington y el Instituto Carnegie de Wáshington. Fermi abandonó Nueva York para tomar parte en el congreso antes de que los experimentos sobre la fisión en Columbia hubiesen empezado. En la reunión, Bohr y Fermi discutieron el problema de la fisión. En particular Fermi hizo presente la posibilidad de que durante el proceso puedan ser emitidos neutrones. Aunque ésta era tan sólo una suposición, su admisión hacía evidente la posibilidad de una reacción en cadena. Un gran número de artículos sensacionales apareció en la prensa sobre este tema.

Antes de que diera término a sus reuniones el congreso de Wáshington, muchos otros experimentos que confirmaban la fisión habían sido empezados y había sido descripta la confirmación experimental por cuatro laboratorios. (Institución Carnegie de Wáshington, y universidades de Columbia, Johns Hopkins y California) como apareció en *Physical Review* del 15 de febrero de 1939. En esta época Bohr supo que experimentos similares habían sido efectuados en su propio laboratorio en Copenhague el 15 de enero. (Carta de Frisch a la

revista *Nature* con fecha 16 de enero de 1939, y aparecida en el número del 18 de febrero). F. Joliot, de París, también publicó sus primeros resultados en los *Comptes Rendus* del 30 de enero 1939. Desde entonces se produjo un constante flujo de artículos sobre el tema de la fisión, tanto que, el 6 de



diciembre de 1939 cuando L. A. Turner, de Princeton, escribió un artículo de información actualizada del tema, en *Reviews of modern Physics,* ya habían aparecido más o menos cien artículos. Un análisis completo y una discusión de estas notas aparecieron en el artículo de Turner y en otras partes.

DISCUSIÓN GENERAL SOBRE LA FISIÓN

1.54. Consideremos la proposición de Frisch y Meitner a la luz de las dos tendencias generales que habían sido descubiertas en la estructura nuclear. De acuerdo con la primera, la proporción de neutrones crece con el número atómico; conforme a la segunda, la energía de combinación por partícula es máxima para un núcleo de número atómico intermedio.

Supongamos que el núcleo del U-238 sea quebrado exactamente en dos mitades; entonces, si despreciamos la masa del neutrón incidente, tenemos dos núcleos de número atómico 46 y de número de masa 119. Pero el isótopo estable más pesado del paladio ($Z = 46$) posee un número de masa de sólo 110. Por lo tanto, cada uno de estos nuevos núcleos imaginarios tiene que emitir nueve neutrones para alcanzar la estabilidad, volviéndose así un núcleo ${}_{46}Pd^{110}$; o bien cuatro neutrones en cada núcleo tienen que transformarse en protones emitiendo electrones, formando así un núcleo estable de estaño de número de masa 119 y de número atómico 50; o bien tiene que ocurrir una combinación de tales emisiones y transmutaciones, que origine otro par de núcleos estables. Pues bien, como lo habían sugerido Hahn y Strassman, que identificaron el bario ($Z = 56$, $A = 135$ a 140) como producto de la fisión, la fractura ocurre en tal forma que se producen dos partes desiguales, de número de masa más o menos 140 y 90, con la emisión de pocos neutrones y una subsiguiente emisión radioactiva de electrones hasta que se forman núcleos estables. Los cálculos a partir de la energía de continuación muestran que cualquiera de estos reajustes proporciona un conjunto resultante de masa considerablemente menor que la masa inicial del núcleo de uranio, de modo que debe ser liberada una gran cantidad de energía..

1.55. Evidentemente, implica tres hipótesis importantes explicar el fenómeno de la fisión: la liberación de energía, la producción de especies atómicas radioactivas, y la posibilidad de una reacción neutrónica en cadena. La liberación de energía podría manifestarse como energía cinética de los fragmentos de la fisión y en la subsiguiente desintegración radioactiva de los productos. La posibilidad de una reacción neutrónica en cadena dependía de si realmente se emitían neutrones o no: una posibilidad que requería investigación.

1.56. Estos eran los problemas sugeridos por el descubrimiento de la fisión, y ésta la clase de cuestiones que fueron expuestas en las revistas de los años 1939 y 1940, y desde entonces ampliamente investigada en secreto. El estudio del proceso y la identificación de la fisión misma, que incluía la producción de neutrones y fragmentos rápidos, fué desarro-

Supongamos que el núcleo del U-238 sea quebrado exactamente en dos mitades; entonces, si despreciamos la masa del neutrón incidente, tenemos dos núcleos de número atómico 46 y de número de masa 119. Pero el isótopo estable más pesado del paladio ($Z = 46$) posee un número de masa de sólo 110. Por lo tanto, cada uno de estos nuevos núcleos imaginarios tiene que emitir nueve neutrones para alcanzar la estabilidad, volviéndose así un núcleo ${}_{46}Pd^{110}$; o bien cuatro neutrones en cada núcleo tienen que transformarse en protones emitiendo electrones, formando así un núcleo estable de estaño de número de masa 119 y de número atómico 50; o bien tiene que ocurrir una combinación de tales emisiones y transmutaciones, que origine otro par de núcleos estables. Pues bien, como lo habían sugerido Hahn y Strassman, que identificaron el bario ($Z = 56$, $A = 135$ a 140) como producto de la fisión, la fractura ocurre en tal forma que se producen dos partes desiguales, de número de masa más o menos 140 y 90, con la emisión de pocos neutrones y una subsiguiente emisión radioactiva de electrones hasta que se forman núcleos estables. Los cálculos a partir de la energía de continuación muestran que cualquiera de estos reajustes proporciona un conjunto resultante de masa considerablemente menor que la masa inicial del núcleo de uranio, de modo que debe ser liberada una gran cantidad de energía..

1.55. Evidentemente, implica tres hipótesis importantes explicar el fenómeno de la fisión: la liberación de energía, la producción de especies atómicas radioactivas, y la posibilidad de una reacción neutrónica en cadena. La liberación de energía podría manifestarse como energía cinética de los fragmentos de la fisión y en la subsiguiente desintegración radioactiva de los productos. La posibilidad de una reacción neutrónica en cadena dependía de si realmente se emitían neutrones o no: una posibilidad que requería investigación.

1.56. Estos eran los problemas sugeridos por el descubrimiento de la fisión, y ésta la clase de cuestiones que fueron expuestas en las revistas de los años 1939 y 1940, y desde entonces ampliamente investigada en secreto. El estudio del proceso y la identificación de la fisión misma, que incluía la producción de neutrones y fragmentos rápidos, fué desarro-

llado ampliamente por químicos que tenían que realizar rápidamente separaciones químicas hasta con cantidades ultramicroscópicas de material y hacer repetidas determinaciones de las vidas medias de los isótopos inestables. Resumiremos el grado de conocimiento alcanzado en junio de 1940. En este período los datos principales sobre la fisión habían sido obtenidos y comunicados al mundo científico. Una reacción en cadena no había sido lograda, pero su posibilidad era clara —por lo menos en principio— y habían sido propuestos varios caminos que podrían conducir a ella.

ESTADO DEL CONOCIMIENTO EN JUNIO DE 1940

Datos definitivos y generalmente conocidos sobre la fisión

1.57. Todos los datos que siguen eran generalmente conocidos en junio de 1940, tanto en Estados Unidos como en otros países:

(1) Que tres elementos —uranio, torio y protoactinio— a veces se dividen en fragmentos aproximadamente iguales cuando se les bombardea con neutrones, y que estos fragmentos son isótopos de elementos del centro de la tabla periódica, que se sitúan entre el selenio ($Z = 34$) y el lantano ($Z = 57$).

(2) Que la mayoría de estos fragmentos de la fisión son inestables, descomponiéndose radioactivamente por sucesiva emisión de partículas beta a través de una serie de elementos, en varias formas estables.

(3) Que estos fragmentos de la fisión poseen una energía cinética muy elevada.

(4) Que la fisión del torio y del protoactinio se puede obtener solamente por medio de neutrones muy rápidos (velocidades de miles de kilómetros por segundo).

(5) Que la fisión en el uranio se puede producir por medio de neutrones rápidos o lentos (los llamados de velocidad térmica); en particular, que neutrones térmicos provocan la fisión de un isótopo, el U-235, pero no del otro, el U-238, y que los neutrones rápidos tienen menor probabilidad de causar la fisión en el U-235 que los neutrones térmicos.

(6) Que para ciertas velocidades de neutrones existe gran sección eficaz de captación en el U-238, produciendo el U-239, pero no la fisión.

(7) Que la energía liberada por la fisión de un núcleo de uranio es aproximadamente de 200 millones de voltios.

(8) Que en el proceso de la fisión se emiten neutrones de alta velocidad.

(9) Que el promedio de neutrones liberados por fisión está más o menos entre uno y tres.

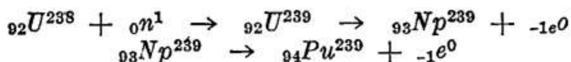
(10) Que neutrones de alta velocidad pueden perder energía por choque inelástico con núcleos de uranio sin que se produzca ninguna otra reacción nuclear.

(11) Que la mayoría de estos datos está de acuerdo con la teoría semiempírica de la estructura nuclear elaborada por Bohr-Wheeler y otros; esto sugería predicciones, basadas sobre esta teoría, que tenían bastante probabilidad de éxito.

INDICIOS DE FISIÓN DEL PLUTONIO

1.58. Se notó que la captación radioactiva de neutrones por el U-238 probablemente iba a llevar a la formación de un núcleo para el cual $Z = 94$ y $A = 239$, por medio de dos emisiones sucesivas de rayos beta. La consideración de la teoría de Bohr-Wheeler de la fisión y de ciertas relaciones empíricas entre los núcleos, de L. A. Turner y otros, sugería que este núcleo sería un emisor de partículas alfa bastante estable y que probablemente sufriría la fisión cuando se le bombardeaba con neutrones térmicos. Más tarde la importancia de una tal fisión térmica para la conservación de la reacción en cadena fué esbozada en correspondencias y discusiones privadas.

De acuerdo con nuestros conocimientos y anotaciones actuales, la reacción particular sugerida se escribe como sigue:



$$ {}_{92}U^{238} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{92}U^{239} \rightarrow {}_{93}Np^{239} + {}_{-1}e^{0} $$
$$ {}_{93}Np^{239} \rightarrow {}_{94}Pu^{239} + {}_{-1}e^{0} $$

donde Np y Pu son los símbolos químicos que se usan ahora para los dos elementos nuevos, el neptunio y el plutonio; ${}_{0}n^{1}$

representa el neutrón y $_{-1}e^{0}$ representa un electrón común (negativo). El plutonio 239 es el núcleo que, con razón, se había supuesto, es fisionable por medio de neutrones térmicos. Esto será discutido ampliamente en otros capítulos.

1.59. En 1940 las reacciones nucleares habían sido estudiadas intensamente desde hacía más de diez años. Habían sido publicados varios libros y artículos de actualización sobre la física nuclear. Habían sido desarrolladas nuevas técnicas para producir y controlar los proyectiles nucleares, para estudiar la radioactividad artificial y para separar cantidades ultramicroscópicas de elementos químicos producidos durante las reacciones nucleares. Habían sido medidas con cuidado las masas de los isótopos. Habían sido medidas las secciones eficaces en la captación del neutrón. Habían sido desarrollados métodos para producir neutrones lentos. Habían sido observados efectos fisiológicos producidos por los neutrones; éstos habían sido aplicados al tratamiento del cáncer. Cada uno de estos datos era por lo general seguro, pero muy incompleto. Quedaban muchas lagunas y muchas imprecisiones. Las técnicas presentaban serias dificultades y las cantidades de material utilizable eran a menudo microscópicas. A pesar de que los principios fundamentales eran claros, la teoría estaba llena de hipótesis no verificadas y los cálculos se presentaban muy difíciles. Las predicciones hechas en el año 1940 por varios físicos de capacidad igualmente excepcional no concordaban entre sí. En muchos aspectos, el tema se parecía más a un arte que a una ciencia.

RESUMEN

1.60. Si miramos retrospectivamente, vemos que en el año 1940 teníamos ya entre manos todas las condiciones previas para dar solución a un problema tan serio como el de producir bombas atómicas mediante el dominio del poder atómico. Se había comprobado que masa y energía son equivalentes. Se había comprobado que los neutrones que inician la fisión del uranio son reproducidos por el proceso mismo, y que además una reacción en cadena podía multiplicarlos produciendo un proceso explosivo.

Por cierto que nadie sabía cómo se habían podido alcanzar las condiciones necesarias, pero muchos hombres de ciencia tenían ideas claras de los problemas implícitos y de los caminos que habrían podido llevar a las soluciones. El próximo capítulo de este informe presenta un planteamiento de los problemas y sirve de guía en los desarrollos de los últimos cinco años.

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

INTRODUCCIÓN

2.1. Desde el momento del primer descubrimiento de la enorme cantidad de energía liberada en las reacciones nucleares, hasta cuando fué descubierta la fisión del uranio, en los círculos científicos se discutió en todos sentidos la idea de la energía atómica e incluso de bombas atómicas. El descubrimiento de los físicos dió a estas pláticas un aspecto mucho menos especulativo, pero la realización de la energía atómica siguió considerándose como algo que sería logrado en un futuro muy lejano, y había cierta desconfianza instintiva hacia muchos sabios que afirmaban lo contrario. Durante los años 1939 y 1940, muchas afirmaciones públicas, algunas de éstas hechas por sabios autorizados, atrajeron la atención sobre la enorme cantidad de energía utilizable en el uranio para explosivos y para fuentes de energía controladas, de modo que el U-235 adquirió popularidad en el mundo sugiriendo grandes acontecimientos por venir. Se hizo presente al gobierno de los EE. UU. la posibilidad de la importancia militar de la fisión del uranio (véase capítulo III), y en una conferencia con los representantes del *Navy Department* en el mes de marzo de 1939, Fermi sugirió la posibilidad de lograr una reacción verificable empleando neutrones lentos o una reacción de carácter explosivo empleando neutrones veloces. Subrayó, sin embargo, que los datos entonces utilizables, eran insuficientes para hacer predicciones precisas.

2.2. En el verano del año 1940 fué posible formular el problema bastante claramente, pero se estaba lejos de poder dar respuesta a varias cuestiones implícitas o siquiera de decidir qué clase de reacción en cadena podría lograrse. En este capítulo daremos un planteamiento del problema en su conjunto. Para mayor claridad haremos uso de algunas nociones que en la época a que nos referimos no eran conocidas y que lo fueron sólo recientemente.

EL PROBLEMA DE LA REACCIÓN EN CADENA

2.3. El fundamento del funcionamiento de una bomba atómica o de una central de energía que utiliza la fisión del uranio es bastante simple. Si un neutrón produce una fisión que a su vez produce más de un nuevo neutrón, el número de fisiones puede aumentar extraordinariamente, liberando enormes cantidades de energía. Es un problema de probabilidad. Los neutrones producidos en el proceso de la fisión pueden escaparse en su totalidad del uranio o pueden ser capturados por impurezas. De modo que el problema de saber si una reacción en cadena puede verificarse o no depende del resultado de una carrera entre cuatro procesos:

1) Pérdida;
2) Captura por parte del uranio sin fisión;
3) Captura por parte de impurezas sin fisión, y
4) Captura con fisión.

Si la pérdida de neutrones según los tres primeros procesos es menor que el sobrante producido por el cuarto, ocurre un proceso en cadena; de lo contrario no ocurre. Evidentemente, cada uno de los tres primeros procesos puede presentarse con una probabilidad tan elevada en ciertas condiciones particulares, que el número suplementario de neutrones generados por la fisión sea insuficiente para alcanzar el ritmo de la reacción. Por ejemplo, puede ocurrir que el proceso (2) —captura por parte del uranio sin fisión— alcance una probabilidad más elevada que la captura con fisión; entonces

presumiblemente no habrá posibilidad de llevar a cabo una reacción en cadena.

2.4. A esto se agrega una complicación más, a saber, que el uranio natural está formado por tres isótopos: U-234, U-235 y U-238, presentes en porcentajes respectivamente de 0,006, 0,7 y 99,3 por ciento. Ya vimos que las probabilidades de los procesos (2) y (4) son distintas para los distintos isótopos. Vimos también que las probabilidades son distintas para neutrones de distintas energías.

2.5. Tenemos ahora que considerar los límites impuestos por los primeros tres procesos y ver cómo puede reducirse su efecto.

FUGA DE NEUTRONES - TAMAÑO CRÍTICO

2.6. El número relativo de neutrones que se escapa de cierta cantidad de uranio puede hacerse mínimo alterando su tamaño y su forma. En una esfera, todo efecto debido a su superficie es proporcional al cuadrado del radio, y todo efecto vinculado al volumen es proporcional al cubo del radio. Ahora bien, el número de neutrones expulsados de una cantidad dada de uranio es un efecto de superficie que depende del área de la superficie, mientras que el número de capturas con fisión es un efecto del volumen, porque la captura ocurre en el interior del material. Por consiguiente, cuanto mayor es la cantidad de uranio, tanto menor es la probabilidad de que el neutrón se escape y tanto mayor es la probabilidad de que el número de capturas supere al número de neutrones expulsados que pueden tornar imposible la reacción en cadena. La pérdida de neutrones por captura sin fisión es un efecto que depende del volumen, como la captura con fisión, de manera que el aumento del tamaño no varía su importancia relativa.

2.7. El tamaño crítico de un dispositivo que contiene uranio es el tamaño correspondiente a una producción de neutrones libres por fisión en número igual a los perdidos por el escape y por captura sin fisión. En otras palabras, si el tamaño es menor que el crítico, entonces —por definición— no podrá originarse una reacción en cadena autosostenida. En principio fué posible calcular el tamaño en el año 1940, pero en la

presumiblemente no habrá posibilidad de llevar a cabo una reacción en cadena.

2.4. A esto se agrega una complicación más, a saber, que el uranio natural está formado por tres isótopos: U-234, U-235 y U-238, presentes en porcentajes respectivamente de 0,006, 0,7 y 99,3 por ciento. Ya vimos que las probabilidades de los procesos (2) y (4) son distintas para los distintos isótopos. Vimos también que las probabilidades son distintas para neutrones de distintas energías.

2.5. Tenemos ahora que considerar los límites impuestos por los primeros tres procesos y ver cómo puede reducirse su efecto.

FUGA DE NEUTRONES - TAMAÑO CRÍTICO

2.6. El número relativo de neutrones que se escapa de cierta cantidad de uranio puede hacerse mínimo alterando su tamaño y su forma. En una esfera, todo efecto debido a su superficie es proporcional al cuadrado del radio, y todo efecto vinculado al volumen es proporcional al cubo del radio. Ahora bien, el número de neutrones expulsados de una cantidad dada de uranio es un efecto de superficie que depende del área de la superficie, mientras que el número de capturas con fisión es un efecto del volumen, porque la captura ocurre en el interior del material. Por consiguiente, cuanto mayor es la cantidad de uranio, tanto menor es la probabilidad de que el neutrón se escape y tanto mayor es la probabilidad de que el número de capturas supere al número de neutrones expulsados que pueden tornar imposible la reacción en cadena. La pérdida de neutrones por captura sin fisión es un efecto que depende del volumen, como la captura con fisión, de manera que el aumento del tamaño no varía su importancia relativa.

2.7. El tamaño crítico de un dispositivo que contiene uranio es el tamaño correspondiente a una producción de neutrones libres por fisión en número igual a los perdidos por el escape y por captura sin fisión. En otras palabras, si el tamaño es menor que el crítico, entonces —por definición— no podrá originarse una reacción en cadena autosostenida. En principio fué posible calcular el tamaño en el año 1940, pero en la

práctica la indefinición de las constantes era tan grande que los distintos valores estimados diferían mucho entre sí. No parecía improbable que el tamaño crítico pudiese ser demasiado grande para poderlo realizar a los fines prácticos. Incluso ahora los valores estimados relativos a dispositivos todavía no realizados varían bastante con el tiempo a medida que se adquieren nuevos conocimientos seguros.

EMPLEO DE UN MODERADOR PARA REDUCIR EL NÚMERO DE CAPTURAS SIN FISIÓN

2.8. En el capítulo I dijimos que los neutrones térmicos presentan la más elevada probabilidad de producir la fisión del U-235, pero también expresamos que los neutrones emitidos en un proceso de fisión poseen velocidades elevadas. Era, evidentemente, una exagerada simplificación, la de afirmar que la reacción en cadena puede ser autosostenida si el número de neutrones producidos por la fisión fuera mayor que el absorbido. Porque la probabilidad de ambas capturas, sin y con fisión, depende de la velocidad de los neutrones. Desgraciadamente, la velocidad correspondiente a la máxima probabilidad de captura sin fisión, se halla comprendida entre la velocidad media de los neutrones emitidos en el proceso de fisión y la velocidad correspondiente a la máxima probabilidad de captura con fisión.

2.9. Durante algunos años antes del descubrimiento de la fisión, el método usual de descelerar los neutrones consistía en hacerlos pasar a través de un material de peso atómico bajo, como los productos hidrogenados. La disminución de la velocidad se logra simplemente mediante choques elásticos entre partículas de alta velocidad y partículas prácticamente inmóviles. Cuanto más se acercan los valores de las masas del neutrón y de la partícula chocada, tanto mayor es la energía cinética perdida por el neutrón. Por consiguiente, los elementos livianos son los "moderadores", esto es, agentes reductores

2.10. A muchos físicos se les ocurrió que era posible mezclar uranio con un moderador de manera tal que se produjese la velocidad de los neutrones veloces de la fisión por debajo de aquel valor que corresponde a la probabilidad máxima de

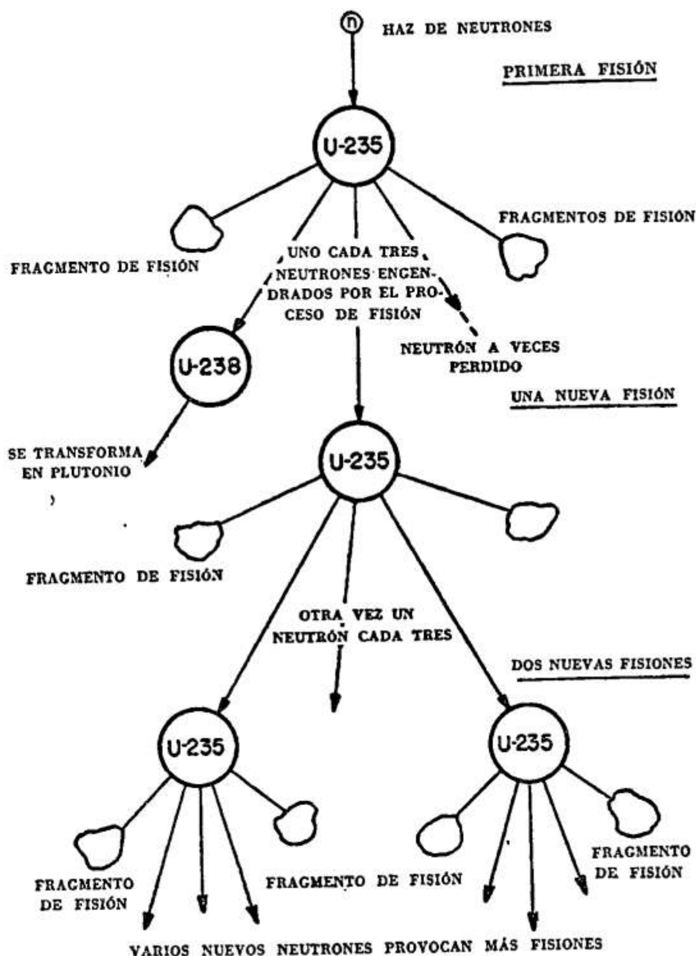


Diagrama esquemático de reacción en cadena originada por la fisión, despreciando el efecto de la velocidad del neutrón. En una reacción explosiva el número de neutrones se multiplica indefinidamente. Es una reacción controlada el número de neutrones alcanza cierto nivel y luego queda constante

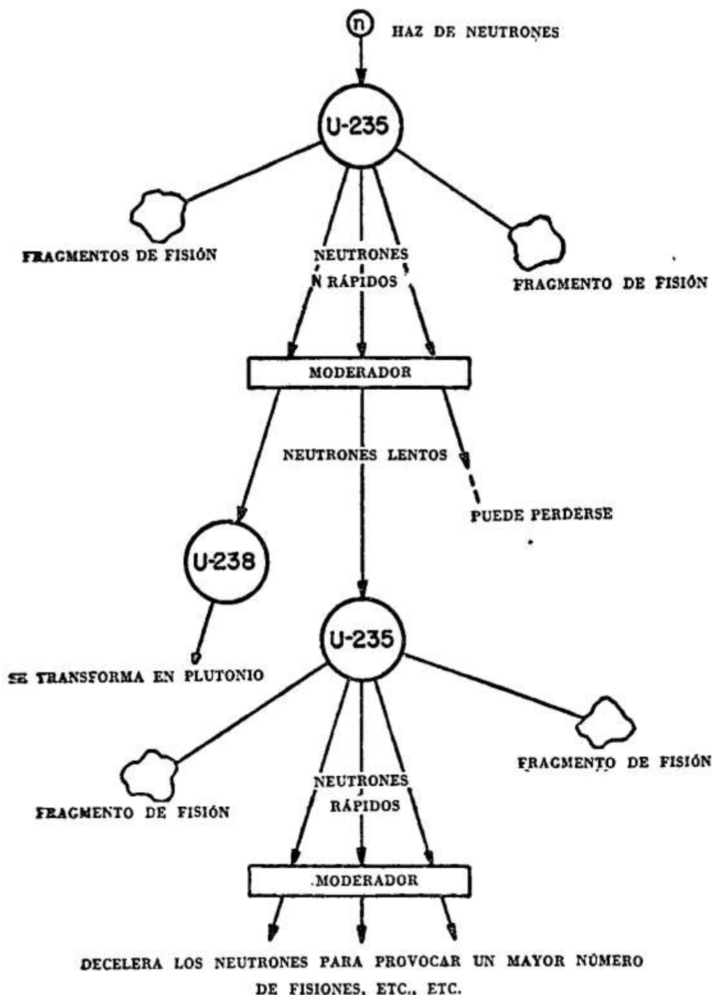


Diagrama esquemático de la reacción en cadena de fisión que utiliza un moderador para decelerar neutrones hasta velocidades más adecuadas para producir fisiones

U-235, es evidente que si llegamos a separar el U-235 del U-238 y a eliminar el U-238, podremos reducir el número de capturas sin fisión y lograr así la reacción en cadena. En efecto, la probabilidad de fisión del U-235 mediante neutrones veloces puede ser suficientemente elevada para hacer innecesario el uso de un moderador cuando haya sido eliminado el U-238. Desgraciadamente, el U-235 se encuentra en el uranio natural sólo en la proporción de más o menos una parte en 140. Además, la diferencia relativamente pequeña de masa entre los dos isótopos hace difícil la separación. En efecto, en el año 1940 no había sido lograda una separación de isótopos en gran escala a excepción del hidrógeno, cuyos dos isótopos difieren en valor de masa por un factor dos. Sin embargo, en seguida se reconoció que la posibilidad de separar a el U-235 era de enorme interés, y tal separación fué en efecto uno de los dos objetivos fundamentales del proyecto durante los últimos cinco años.

PRODUCCIÓN Y PURIFICACIÓN DE LOS MATERIALES

2.13. Hemos afirmado antes que la sección eficaz de captura de neutrones varía mucho de un material a otro. En algunos, ésta es muy grande en relación con la sección eficaz correspondiente a la probabilidad máxima de fisión del uranio. Si queremos, pues, abrigar la esperanza de lograr una reacción en cadena, debemos disminuir el efecto (3) —captura sin fisión debida a impurezas— hasta un grado en que ya no sea perjudicial. Esto significa una purificación muy cuidadosa del metal uranio y del moderador. Los cálculos muestran que la máxima concentración tolerable de muchas impurezas es de pocos millonésimos, ya sea en el uranio, ya en el moderador. Si recordamos que en el año 1940 la cantidad total de uranio metálico producido en la Unión no pasaba de pocos gramos, y que además su pureza era dudosa, que la cantidad total de berilio metálico producido en el país no era superior a pocas libras, que la cantidad total de deuterio concentrado producido no excedía de pocas libras y que el carbono nunca había sido producido en estado de pureza en cantidades requeridas por el moderador, resulta claro que el problema de producir y purificar los materiales era el más crítico.

CONTROL DE LA REACCIÓN EN CADENA

2.14. Los problemas discutidos hasta ahora están específicamente vinculados con la realización de la reacción en cadena. Si una tal reacción es destinada a ser empleada, debemos ponernos en condiciones de controlarla. El problema del control es distinto si estamos interesados en una producción continua de energía o en una explosión. En general, la producción continua de energía atómica requiere, en cadena, una reacción lenta producida por neutrones nacidos por fisión en una mezcla o estructura de uranio y de un moderador; una bomba atómica, en cambio, requiere, en cadena rápida, una reacción producida por neutrones de fisión en el U-235 o en el Pu-239, mientras que los neutrones lentos de fisión o los rápidos pueden contribuir en cada caso. Parecía verosímil, ya en el año 1940, que el empleo de absorbentes de neutrones podía permitir el control de la energía de una reacción en cadena. Se consideraba además posible, aunque no seguro, que una reacción en cadena de esta naturaleza fuese autoeliminada debido a la baja probabilidad de que se verificaran capturas con fisión una vez alcanzada una temperatura más elevada. Sin embargo, persisitía la posibilidad de que un sistema en que se estuviera desarrollando una reacción en cadena se saliera del control, y por esto pareció necesario efectuar los experimentos sobre reacciones en cadena en un lugar deshabitado.

APLICACIÓN PRACTICA DE LA REACCIÓN EN CADENA

2.15. Hasta ahora hemos discutido la producción y el control de una reacción en cadena, pero no su empleo. La distancia, desde el punto tecnológico, entre la producción de una reacción controlada en cadena y el empleo en gran escala como fuente de poder explosivo, es comparable a la distancia que separa el descubrimiento del fuego de la fabricación de una locomotora a vapor.

2.16. Aunque la producción de energía nunca ha sido el objeto principal de esta empresa, se ha dedicado suficiente atención a este aspecto para poner en evidencia la mayor dificultad: el logro de una operación a temperatura elevada. Una

máquina térmica eficiente no sólo debe desarrollar calor, sino que debe desarrollar calor a temperatura elevada. Conseguir que un sistema que reacciona según un proceso en cadena a temperatura elevada convierta en trabajo útil el calor generado, es mucho más difícil que aprovechar un sistema con reacción a baja temperatura.

2.17. Naturalmente, la comprobación de que una reacción en cadena es posible, no puede por sí misma asegurar que la energía nuclear es eficiente en una bomba. Para conseguir una verdadera explosión es necesario que la reacción en cadena se desarrolle de una manera extremadamente veloz; de lo contrario, sólo una pequeña cantidad de energía nuclear será utilizada antes que la bomba se parta en pedazos interrumpiendo la reacción. Es también necesario que no se produzca una explosión prematura. Cuanto se refiere a la "detonación" constituyó y constituye uno de los problemas más difíciles en el proyecto de una bomba atómica de alta eficiencia.

POSIBILIDAD DE EMPLEAR PLUTONIO

2.18. Hasta ahora el empleo del uranio ha constituído el punto central de toda discusión. Ya recordamos la suposición de que un elemento de número atómico 94 y masa 239, llamado comúnmente plutonio, pudiese ser muy eficiente. Pues bien, ahora creemos que su valor es análogo al del U-235 puro. Hemos recordado la dificultad de separarlo del isótopo más abundante, el U-238. Estos dos isótopos son, por supuesto, químicamente, idénticos. El plutonio, en cambio, que también deriva del U-238, es un elemento químicamente distinto. Por lo tanto, si fuera posible elaborar un proceso para transformar una parte del U-238 en plutonio, una separación química del plutonio del uranio, podría presentarse como más práctica que la separación del U-235 del U-238.

2.19. Supongamos haber realizado una reacción en cadena en una estructura de uranio natural con un moderador, por ejemplo, de carbono en forma de grafito. Tan pronto como se inicie la reacción en cadena, habrá neutrones emitidos en el proceso de la fisión del U-235, y muchos de estos neutrones

serán absorbidos por el U-238. Esto produce el U-239, cada átomo emite luego partículas beta, volviéndose neptunio ($_{93}Np^{239}$). El neptunio, a su vez, emite una partícula alfa, degradándose de nuevo en U-235, pero tan lentamente que se le puede considerar como un elemento estable. (Véase la figura de la página ...). Si después de haber dejado cumplirse esta reacción durante un tiempo considerable, se elimina la mezcla de metal, se hace posible la extracción del plutonio por métodos químicos, y su purificación para emplearlo otra vez en una fisión con reacción en cadena de naturaleza explosiva.

EFECTOS COMBINADOS Y PILAS ENRIQUECIDAS

2.20. Hemos descripto tres procedimientos para aumentar la posibilidad de una reacción en cadena: el empleo de un moderador; el logro de materiales de extrema pureza; el empleo de materiales especiales, uno de los dos U-235 o Pu. Los tres procedimientos no se excluyen mtuamente y han sido propuestos muchos esquemas que utilizan pequeñas cantidades de U-235 o Pu-239 separados en una estructura compuesta esencialmente de uranio ordinario u óxido de uranio y de un moderador, o de dos moderadores distintos. Los dispositivos de este tipo que se han propuesto son usualmente llamados "pilas enriquecidas".

EMPLEO DEL TORIO O DEL PROTOACTINIO O DE OTRO MATERIAL

2.21. Toda nuestra discusión previa se refirió esencialmente al empleo directo o indirecto del uranio, pero se sabía que el torio y el protoactinio también dan origen a la fisión cuando son bombardeados por neutrones de alta velocidad. La gran ventaja del uranio, por lo menos en un trabajo preliminar, era su posibilidad de utilizar neutrones lentos. No se dió mucha importancia a las otras dos sustancias. El protoactinio puede no ser tomado en cuenta debido a su escasez en la naturaleza. El torio es relativamente abundante pero no presenta ventajas evidentes sobre el uranio.

2.22. No hay que olvidar que teóricamente muchas reac-

ciones nucleares pueden ser empleadas para liberar energía. Actualmente no vemos la manera de iniciar o controlar reacciones distintas de las que implican la fisión, pero algunas de aquellas reacciones que ya han sido consideradas como fuente de la energía solar tal vez podrán ser reproducidas en el laboratorio.

CANTIDADES NECESARIAS DE MATERIALES

2.23. Evidentemente, en el verano de 1940 era imposible hacer más que suposiciones acerca de qué cantidades se necesitarían para producir:

1) Una reacción en cadena con empleo de un moderador.
2) Una bomba de reacción en cadena mediante U-235 o plutonio puros o por lo menos enriquecidos.

Una cantidad de uno a cien kg de U-235 era normalmente considerada en aquel tiempo como tamaño crítico de una bomba. Esto imponía naturalmente tratar por lo menos una cantidad de uranio natural 140 veces superior. Era casi seguro que toneladas de material y de moderador habrían sido necesarias si se hubiera empleado una reacción en cadena desatada por neutrones lentos que empleara moderador y uranio no purificado.

DISPONIBILIDAD DE LOS MATERIALES

2.24. Los análisis de la composición de la corteza terrestre muestran que tanto el uranio como el torio están en ella presentes en cantidades considerables (más o menos 4 partes por millón de uranio y 2 partes por millón de torio. Se sabe que existen depósitos de uranio en el Colorado, en la región del Great Bear Lake (o Lago del Oso) del Norte del Canadá, en Checoeslovaquia (Joachimstal) y en el Congo belga. Se sabe además que existen muchos otros depósitos de mineral de Uranio, pero en muchos casos su extensión está todavía inexplorada. Siempre se encuentra el uranio junto al radio, también en grandes cantidades. Ambos se encuentran a menudo junto a mineral de vanadio. Pequeñas cantidades de óxido de ura-

nio han sido empleadas durante muchos años en la industria cerámica.

2.25. También el torio está muy difundido en la naturaleza; se encuentra el óxido de torio en concentraciones elevadas en las arenas monacíticas. Estas arenas se encuentran en cierta extensión en Estados Unidos de Norte América, pero particularmente en Brasil y en la India británica.

2.26. Las primeras estimaciones groseras, que probablemente son optimistas, indican que la energía nuclear utilizable en los depósitos de uranio conocidos es suficiente para proporcionar el total de la energía necesaria a la Unión durante 200 años (considerando la utilización del U-238 y del U-235).

2.27. Como ya hemos recordado, hasta el año 1940 se había producido poco o nada de uranio metálico, y la información era tan pobre que hasta el punto de ebullición era desconocido. (Por ejemplo, el *Handbook of Physics and Chemistry* del año 1943-1944 indica sólo que el punto de ebullición es inferior a 1850°C., mientras que ahora sabemos que éste se encuentra cerca de 1150°C.). Evidentemente, por lo que se refiere al uranio, no existían dificultades insuperables en lo que atañe al material en bruto o a la manera de extraer el metal, pero se presentaban graves dudas sobre el tiempo que esto habría de llevar y sobre cuánto habría costado producir metal puro en las cantidades necesarias.

2.28. De todos los materiales adecuados como moderadores, antes nombrados, el deuterio presentaba las ventajas más evidentes. Se encuentra en el hidrógeno ordinario en la proporción de 1 parte en 5.000. Durante el año 1940 se empleó cierto número de métodos distintos para separarlo del hidrógeno y en Estados Unidos se habían producido unos pocos litros con propósitos experimentales. La única proporción en gran escala se hallaba en una instalación noruega; de allí habían salido varios centenares de litros de agua pesada (D^2O, óxido de deuterio). Como en el caso del uranio, se presentaba un problema de costo y de tiempo.

2.29. El berilio es muy común en forma de silicato de berilio, pero se lo encuentra en pequeñas cantidades en forma de

mineral. Su empleo en las aleaciones ha llegado a ser general en los últimos años; para este empleo no es necesario, sin embargo, producir berilio en forma metálica. En el año 1840 en Estados Unidos se habían producido sólo 700 libras de metal.

2.30. En lo que se refiere al carbono, la situación era, por supuesto, completamente distinta. Cada año se producían muchos centenares de toneladas de grafito. Ésta era la razón por la cual se consideraba muy deseable emplear grafito como regulador. Las dificultades consistían en la obtención de cantidades de grafito de la pureza necesaria, sobre todo teniendo en cuenta el aumento de las necesidades de la industria bélica.

ESTIMACIONES DE TIEMPO Y COSTO

2.31. Las necesidades de tiempo y de dinero dependían no sólo de muchos factores científicos y tecnológicos desconocidos, sino también de decisiones políticas. Evidentemente, eran necesarios muchos millones de dólares para alcanzar el objetivo final. En esa época se logró sólo evaluar el tiempo y el dinero necesarios para precisar las perspectivas técnicas y científicas.

Parecía que no habría sido un trabajo excesivo realizar el estudio de una reacción en cadena con neutrones térmicos en un edificio de grafito-uranio hasta poder entender cómo se producía efectivamente la reacción. Según las estimaciones de la época, requería, aproximadamente, el transcurso de un año y cien mil dólares para conestar a esta pregunta. Estas estimaciones consideraban un sistema de reacción en cadena de energía muy baja sin sistema de enfriamiento u otros medios de utilización de la energía liberada.

RIESGOS DE ENFERMEDADES

2.32. Desde hace mucho tiempo se sabe que los materiales radioactivos son peligrosos. Desprenden radiaciones muy penetrantes —rayos gama— muy parecidos en sus efectos fisiológicos a los rayos X. Desprenden también radiaciones alfa y beta, que a pesar de ser menos penetrantes, pueden llegar

a ser peligrosas. Las cantidades de radio empleadas en los hospitales y en las mediciones físicas ordinarias generalmente no exceden de pocos miligramos. Las cantidades de material radioactivo producidas por la fisión del uranio en un sistema de reacción en cadena relativamente pequeño pueden equivaler a centenares o millares de gramos de radio. Una reacción en cadena emite también una intensa radiación en neutrones, cuyos efectos fisiológicos son comparables a los de los rayos gama. Aparte de sus propiedades radioactivas, el uranio es químicamente tóxico. De manera que todo trabajo en este campo es peligroso y en particular las experiencias sobre reacciones en cadena y los productos radioactivos resultantes.

MÉTODO DE ABORDAR EL PROBLEMA

2.33. Había dos maneras de intentar la solución del problema. Una era la de efectuar una serie de mediciones físicas cuidadosas sobre la sección eficaz de distintos materiales para distintos procesos excitados por neutrones y distintas energías neutrónicas. Una vez que estos datos fueran utilizables se habrían podido hacer cálculos con buena aproximación, hasta llegar a saber lo que podría hacerse en lo relativo a la reacción en cadena. La otra manera de abordar el problema era puramente empírica y consistía en mezclar uranio o compuestos de uranio de varias maneras con distintos moderadores, y observar lo qué ocurría. Tan distintos métodos eran posibles en el caso del problema de la separación de isótopos. Ahora bien, se adoptó un método intermedio entre los dos.

ENERGÍA VERSUS BOMBAS

2.34. Las ventajas militares esperadas de la bomba atómica eran mucho más notables que las de una central de energía atómica. Cabía pensar que pocas bombas de uranio podían dar la victoria decisiva al bando que la hubiera empleado primero. Tales pensamientos estaban en las mentes de los que trabajaban en este campo, pero parecía necesario dar un paso preliminar en el desarrollo de nuestros conocimientos realizando una reacción en cadena con neutrones lentos, y éste se

convirtió en el primer objetivo de las personas interesadas en este problema. Además, ello parecía un punto importante para convencer a las autoridades militares y a los hombres de ciencia más escépticos, de que todo el programa no era un sueño utópico. En parte por estas razones, y en parte debido al absoluto secreto impuesto en ese tiempo, la idea de una bomba atómica no aparece ya en las publicaciones entre el verano de 1940 y fines de 1941.

UTILIDAD MILITAR

2.35. Si todos los átomos de un kilogramo de U-235 sufren la fisión, la energía liberada equivale a la energía liberada en la explosión de 20.000 toneladas de TNT. Si el tamaño crítico de la bomba llega a ser práctico —del orden de cien o doscientos kilogramos— y todos los demás problemas pueden resolverse, quedan aún dos puntos que aclarar. Primero, ¿a qué porcentaje de núcleos susceptibles de sufrir la fisión se les puede fisionar de hecho antes que la reacción se termine?; o sea, ¿cuál es la eficiencia de la explosión? Segundo, ¿cuál es el efecto de la liberación de una energía tan concentrada? Aun si sólo una parte sobre cien de la energía teóricamente disponible es liberada, la explosión será de un orden de magnitud totalmente diferente de la de cualquier otra bomba conocida hasta ahora. El valor de una bomba de esta índole constituía un problema que merecía ser considerado con todo cuidado.

RESUMEN

2.36. Se había llegado a estas conclusiones: (1) que la fisión del uranio debe ser acompañada por la liberación de una gran cantidad de energía; y (2), que durante el proceso son puestos en libertad neutrones suplementarios que pueden originar una reacción en cadena. No era contrario a ningún principio conocido el que pueda producirse una reacción en cadena, y ésta habría podido tener una enorme importancia militar en forma de bomba. Por otra parte, la idea era revolucionaria, y por ende despertaba recelos; era además cierto

que muchas operaciones técnicas de gran dificultad habrían tenido que ser estudiadas antes de que una bomba tal hubiera podido ser producida. Probablemente los únicos materiales satisfactorios para la bomba eran, o el U-235, que tenía que ser separado del isótopo U-238, 140 veces más abundante, o el Pu-239, un isótopo del hasta entonces desconocido elemento plutonio, que habría tenido que ser producido por un proceso de reacción en cadena controlada, lo cual hasta entonces era también desconocido. Para lograr una tal reacción en cadena controlada, era claro que había que producir grandes cantidades de uranio metálico y agua pesada o berilio o carbono extremadamente puros. Después de haber producido el material para la bomba, habría sido necesario desarrollar un proceso para usarlo con seguridad y eficiencia. En algunos de los procesos era posible encontrar nuevos peligros para la salud.

PROBLEMA POLÍTICO

2.37. En el verano del año 1940 había sido formado el Comité Nacional de Investigaciones para la Defensa, el que había pedido a muchos hombres de ciencia residentes en el país que realizaran distintas tareas militares urgentes. El personal científico era sin embargo limitado, y no fué completado en aquella época. Era realmente difícil establecer con qué ritmo tenía que ser orientado el trabajo con miras de fabricar una bomba atómica. La decisión hubo de ser revisada a intervalos frecuentes en los cuatro años siguientes. Una visión de cómo se llegaban a tomar estas decisiones políticas, se da en los capítulos III y V.

Capítulo III

HISTORIA DE LA ADMINISTRACIÓN HASTA DICIEMBRE DE 1941

INTERÉS DE POSIBILIDADES MILITARES

3.1. El anuncio de la hipótesis de la fisión y su confirmación experimental tuvo lugar en enero de 1939, como ya dijimos en el capítulo I. La posibilidad de una utilización militar de una gran cantidad de energía liberada en la fisión despertó en seguida un gran interés. En aquella época los especialistas norteamericanos en física nuclear estaban tan poco acostumbrados a la idea de poner su ciencia al servicio de fines militares, que llegaban difícilmente a darse cuenta de lo que era preciso hacer. Por consiguiente, los primeros esfuerzos dirigidos a limitar las publicaciones y a lograr el apoyo del gobierno fueron hechos por un pequeño grupo de físicos extranjeros dirigidos por L. Szilard y que comprendía a E. Wigner, E. Teller, V. F. Weisskopf y E. Fermi.

LIMITACIONES EN LAS PUBLICACIONES

3.2. En la primavera del año 1939, el grupo antes nombrado obtuvo la cooperación de Niels Bohr con el objeto de no dar a publicidad datos ulteriores por acuerdo voluntario. Los orientadores de la física en Inglaterra y en los Estados Unidos aceptaron, mientras que F. Joliot, la más alta autori-

dad en física nuclear de Francia, se rehusó aparentemente porque envió una carta para que fuera publicada al *Physical Review* antes que todos los norteamericanos hubiesen dado su aprobación. Por consiguiente, la publicación continuó libremente durante más o menos otro año más, aunque unas pocas notas fueron retenidas voluntariamente por sus propios autores.

3.3. En el mes de abril de 1940, durante un congreso del Departamento de Ciencias Físicas del Consejo Nacional de Investigaciones, G. Breit propuso la formación de un Comité de censura al que fuesen sometidas las publicaciones de todos los periódicos científicos norteamericanos. Aunque la razón de esta sugestión fuese en primer término el deseo de reservarse el derecho de las publicaciones sobre la fisión del uranio, el "Comité de Informaciones" que finalmente fué instalado poco después de la primavera (en el Consejo Nacional de Investigaciones) tenía carácter general y estaba organizado con el fin de controlar el plan y fines de las publicaciones en todos los dominios de posible interés militar. El presidente del Comité era L. P. Eisenhart; otros miembros eran: G. Breit, W. M. Clark, H. Fletcher, E. B. Fred, G. B. Pegram, H. C. Urey, L. H. Weed y E. G. Wever. Se constituyeron varios subcomités, el primero de los cuales se ocupaba de la fisión del uranio. G. Breit dirigía este subcomité; sus demás miembros eran: J. W. Beams, L. J. Briggs, G. B. Pegram, H. C. Urey y E. Wigner.

En general, el procedimiento seguido era que los directores de los distintos periódicos enviaban copias de los artículos en este dominio, en el caso en que la licitud de su publicación fuese dudosa, sea directamente a Breit, sea indirectamente a éste a través de Eisenhart. Breit generalmente los hacía circular entre los miembros del subcomité para que se considerase si tenían que ser publicados o no e informaba a los directores de la decisión. Este procedimiento tuvo mucho éxito en prevenir la publicación y siguió formalmente rigiendo, de manera modificada hasta junio de 1945. Además, el empleo de la mayoría de los físicos residentes en la Unión en trabajos de guerra por una razón u otra redujo rápidamente el número

de los artículos de competencia de este Comité hasta un punto en que prácticamente no hubo más. Es interesante observar que todo este convenio fué puramente voluntario; los hombres de ciencia de los Estados Unidos son merecedores de congratulaciones por su colaboración total. Hay que esperar que después de la guerra será posible publicar estos artículos, por lo menos en parte, de manera que podrá hacerse justicia a sus autores en lo que respecta al valor de sus colaboraciones.

PRIMER ACERCAMIENTO CON EL GOBIERNO

PRIMERA COMISIÓN

3.4. En el aspecto positivo —interés y ayuda a la investigación en física nuclear—, la historia es mucho más complicada. El primer contacto con el gobierno fué establecido por Pegram, de la Universidad de Columbia en el mes de marzo de 1939. Pegram habló por teléfono con el Departamento de la Marina y concertó una conferencia entre Fermi y personas representativas del mencionado Departamento. El único resultado de esta conferencia fué que la Marina manifestó su interés y pidió ser tenida al corriente del asunto. La tentativa siguiente de interesar el gobierno fué hecha por Szilard y Wigner. En el mes de julio de 1939 ellos conferenciaron con Einstein y poco después Einstein, Wigner y Szilard discutieron el problema con Alejandro Sachs, de Nueva York. Sachs, con el apoyo de una carta de Einstein, explicó al Presidente Roosevelt cuán deseable era que se apoyaran los trabajos en este dominio. El presidente creó una Comisión conocida con el nombre de "Comisión de Asesoramiento del Uranio" integrada por Briggs (director del *Bureau of Standards*) como director, el coronel K. F. Adamson del *Army Ordnance Department* y el comandante G. S. Hoover del *Navy Bureau of Ordnance* y pidió a este comité que examinara el problema. Éste era el único comité oficial del uranio en la época de la organización del Comité Nacional de Investigaciones para la Defensa, en junio de 1940. El comité se reunía sin formali-

dades e incluía un número adicional de personalidades científicas en sus reuniones.

3.5. La primera reunión del Comité del Uranio tuvo lugar el 21 de octubre de 1939 e incluía, además de los miembros del mismo a F. L. M Mohler, Alexander Sachs, L. Szilard, E. Wigner, E. Teller y R. B. Roberts. El resultado de esta reunión fué un informe con fecha 1º de noviembre de 1939, que fué transmitido al presidente Roosevelt por Briggs, Adamson y Hoover. Este informe hacía ocho recomendaciones que no nos corresponde detallar aquí. Es interesante consignar, sin embargo, que hace expresa mención de ambas posibilidades, o sea la utilización de la energía y la realización de una bomba. Este informe recomienda particularmente que se consigan 4 toneladas de grafito y 50 toneladas de óxido de uranio con el objeto de realizar mediciones de la sección eficaz de absorción del carbono. Figuraban además otras recomendaciones, algunas de naturaleza general y otras que nunca fueron tomadas en cuenta. Evidentemente, el memorándum preparado por Szilard fué más o menos la base de la discusión de esta reunión.

3.6. La primera entrega de fondos (6.000 dólares) hecha por la Armada y el Ejército para procurarse el material especificado en las recomendaciones, figura en el informe presentado por Briggs al general E. M. Watson (ayudante del presidente Roosevelt) con fecha 20 de febrero de 1940. La reunión siguiente del "Comité de Asesoramiento del Uranio" tuvo lugar el 28 de abril de 1940 y participaron en ella Sachs, Pegram, Fermi, Szilard, Briggs, el almirante Bowen, el coronel Adamson y el comandante Hoover. En la época de esta reunión, dos nuevos factores importantes surgieron en la situación. En primer lugar, se descubrió que la fisión del uranio originada por neutrones de velocidad térmica se verificaba sólo en el isótopo U-235. En segundo lugar se tuvo conocimiento de que una importante sección del Instituto "Kaiser Wilhelm" de Berlín había sido puesta al servicio de investigaciones sobre el uranio. A pesar de que el cariz de la discusión en esta reunión parecía demostrar que el trabajo había sido impulsado con mayor resolución, ninguna recomendación definida

salió a luz. Se observó que los resultados de mediciones críticas sobre el carbono, en curso en la Universidad de Columbia, tenían que ser conocidos antes de tomar nuevas decisiones.

3.7. En las semanas siguientes, cierto número de personas, y particularmente Sachs, hicieron presente que era urgente e importante lograr apoyos más importantes y una mejor organización. Su conducta fué fortalecida por los resultados de la Universidad de Columbia (como aparece consignado, por ejemplo, en una carta de Sachs al general Watson fechada el 15 de mayo de 1940), que demuestran que la absorción del carbono era notablemente menor de lo que previamente se había pensado, y que la probabilidad de que el carbono resultara un moderador satisfactorio era por ende considerable. Sachs se mostró también activo en la consideración del problema de proporcionar mineral. El 1º de junio de 1940, Sachs, Briggs y Urey se encontraron con el almirante Bowen para discutir un cantacto oficial con la Unión Minera del Congo Belga. Este contacto fué establecido poco tiempo después por Sachs.

3.8. La situación general del problema fué discutida por un grupo de asesores especiales reunido por Briggs en el National Bureau of Standards el 15 de junio de 1940. En esta reunión participaron Briggs, Urey, M. A. Tuve, Wigner, Breid, Fermi, Szilard y Pegram. "Después de una discusión completa, la recomendación del grupo del comité del Uranio fué que había que pensar en los recursos materiales para llevar adelante las investigaciones sobre experiencias acerca del uranio-carbono siguiendo dos caminos:

(A) más mediciones de las constantes nucleares contenidas en el tipo de reacción propuesto;

(B) experimentos con cantidades de uranio y de carbono iguales a aproximadamente una quinta o cuarta parte de la cantidad que podía ser considerada como mínima para que una reacción en cadena pudiera resultar auto-mantenida.

"Se consideró que más o menos 40.000 dólares serían necesarios para efectuar más mediciones de las constantes fundamentales, y que se necesitarían uranio metálico y grafito puro para las experiencias intermediarias por un valor de 100.000

dólares (cifras tomadas del memorándum de Pegram a Briggs fechado el 14 de agosto de 1940).

RECONSTITUCIÓN DEL COMITÉ BAJO EL D.D.R.C. (*)

3.9. Antes que cualquier decisión tomada en esta conferencia pudiera ser realizada, se anunció en junio de 1940 la organización del Comité de Investigaciones para la Defensa Nacional, y el presidente Roosevelt dispuso que el Comité del Uranio tenía que ser reestructurado como Subcomité del N.D.R.C. bajo la dirección de Vannevar Bush (presidente del N.D.R.C.). Los miembros del Comité reconstituído del Uranio eran los siguientes: Briggs, presidente; Pegram, Urey, Beams, Tuve, R. Gunn y Breit. Autorizado por Briggs, Breit consultó a menudo a Wigner y Teller aunque no fueran miembros del Comité. Desde esa época hasta el verano de 1941, este Comité funcionó aproxidamente con los mismos miembros. Sus recomendaciones fueron transmitidas por Briggs al N.D.R.C. y fueron suscriptos contratos adecuados entre el N.D.R.C. y varios Institutos de Investigación. Sin embargo, los fondos fueron proporcionados al principio por el Ejército y la Armada, y no por un fondo propio del N.D.R.C.

APOYO ECONÓMICO A LA INVESTIGACIÓN

3.10. El primer contrato hecho en esta nueva fase fué establecido con la Universidad de Columbia acerca de los dos rumbos de investigación recomendados en la reunión del 15 de junio, como dijimos antes. El proyecto fué aprobado por el N.D.R.C. y el primer contrato hecho por el N.D.R.C. (N.D. Crc-32) fué firmado el 8 de noviembre de 1940, rigiendo desde el 1º de noviembre de 1940 hasta el 1º de noviembre de 1941. El valor de este contrato era de 40.000 dólares.

3.11. Muy pocos gastos fueron hechos antes que el contrato se hiciera efectivo. Por ejemplo, alrededor de 3.200 dólares habían sido gastados en grafito y cadmio, suma que era parte de los 6.000 dólares concedidos por la Armada y el Ejército en febrero de 1940.

(*) National Defense Research Committee (Comité de Investigaciones para la Defensa Nacional). *(N. del T.)*

3.12. No nos detendremos a analizar en detalle otros contratos que fueron hechos anteriormente a diciembre de 1941. Su número y su gasto total aumentó gradualmente. Urey empezó a trabajar en la separación del isótopo por el método de centrifugación, contratado por la Armada a fines de 1940. Otros contratos fueron hechos con las universidades de Columnia y Princeton, con la Compañía Standard Oil, con la Universidad de Cornell, con el Instituto Carnegie de Wáshington, con la niversidad de Minnesota, con el College del Estado de Iowa, con la Universidad Johns Hopkins, con el *National Bureau of Standards,* con las universidades de Virginia, Chicago y California durante el invierno y la primavera 1940-1941 hasta que en noviembre de 1941 el número total de los proyectos aprobados alcanzaba a 60, totalizando más o menos 300.000 dólares.

3.13. El valor de los gastos expresa en forma bruta un índice de actividad. Es además interesante comparar este valor con los que figuran en otras ramas de la investigación de guerra. En noviembre de 1941, el total del presupuesto aprobado por el N.D.R.C. para el Laboratorio de Radiaciones en el Instituto de Tecnología de Massachussetts alcanzaba a varios millones de dólares. Incluso un laboratorio relativamente pequeño, tal como la sección S. de la División A del N.D.R.C., había gastado o había sido autorizado a gastar 136.000 dólares en un trabajo que resultó provechoso pero cuyo rendimiento potencial no podía ser comparado, ni con mucho, con el trabajo sobre el uranio.

COMITÉ REORGANIZADO EN EL VERANO DE 1941

3.14. El Comité del Uranio, tal como se formó en el verano de 1940, continuó sin cambios esenciales hasta el verano de 1941. En esta época, el Comité principal había sido ampliado un poco y habían sido creados los subcomités para la separa ción del isótopo, los aspectos teóricos, la producción de energía y el agua pesada (*). La sección del Uranio o la S-1 del

(*) Sección Uranio: presidente, Briggs; vicepresidente, Pegram; S. K. Allison, Beams, Breit, E. U. Condon, H. D. Smyth, Urey.

N.D.R.C. Este Comité, sin que se produjera su disolución formal hasta el verano de 1942, fué ampliamente substituído en diciembre de 1941 (véase capítulo V).

LA ACADEMIA NACIONAL INSPECCIONA EL COMITÉ

3.15. En la primavera de 1941, Briggs, considerando que era deseable una revisión imparcial del problema, solicitó a Bush que fuera nombrado como revisor del Comité. Bush entonces requirió formalmente a F. B. Jewett, presidente de la Academia Nacional de Ciencia que ésta dirigiera este Comité. Jewett consintió, nombrando presidente a A. H. Compton; W. D. Coolidge, E. O. Lawrence, J. Slater, J. H. Van Vleck y B. Gherardi. (Por razones de salud Gherardi no pudo actuar). Este Comité recibió instrucciones de evaluar la importancia militar del problema del uranio y de estudiar el valor de los gastos que habría significado la investigación del problema.

3.16. Este comité se reunió en el mes de mayo y preparó un informe. (Este informe y los sucesivos serán resumidos en el próximo capítulo). Sobre la base de este informe y la exposición oral hecha por Briggs antes de la reunión del N.D.R.C., fué aprobado un presupuesto de 267.000 dólares, ratificado por el N.D.R.C. en su reunión del 18 de julio de 1941, fecha en que se indicó que probablemente serían necesarios gastos ulteriores. Bush solicitó un segundo informe que pusiera de manifiesto los aspectos de ingeniería, y O. E. Buckley, de los laboratorios de la Bell Telephone y L. W. Chubb, de la Compañía de productos eléctricos Westinghouse, fueron agregados a este Comité para contestar a este pedido. (Compton estudió en Sudamérica durante el verano y por consiguiente no pudo participar en las reuniones de verano del Comité). El segundo informe fué presentado por Coolidge. Como resultado de

Subsección de separación: presidente, Urey; Beams.
Subsección de producción de energía: presidente, Pegram; Allison; Fermi, Smyth, Szilard.
Subsección del agua pesada: presidente, Urey; T. H. Chilton.
Subsección de los aspectos teóricos: Fermi; Breit, C. H. Eckart, Smyth, Szilard, J. A. Wheeler.

las nuevas mediciones de la sección eficaz de la fisión del U-235, y debido al convencimiento siempre más profundo de que la separación del isótopo era posible, en setiembre de 1941 Compton y Lawrence sugirieron a J. B. Conant, del N.D.R.C., quien trabajaba en estrecho contacto con Bush, que era deseable un tercer informe. Como Bush y Conant se habían enterado durante el verano de 1941 de que los ingleses también se habían vuelto muy optimistas, se pidió que el Comité fuera ampliado agregando a V. K. Lewis, R. S. Mulliken, y G. B. Kistiakowsky. El tercer informe fué preparado por Compton el 6 de noviembre de 1941.

NOTICIAS RECIBIDAS DE INGLATERRA

3.17 A comienzos de 1940 existía cierto intercambio de noticias con los ingleses, y durante el verano de 1941, Bush se enteró de que ellos habían revisado todo el tema en el período que va de abril a julio. Ellos también se habían interesado en la posibilidad de emplear plutonio; en efecto, en una carta dirigida por J. D. Cockroft a R. H. Fowler, fechada el 28 de diciembre de 1940, expresa la opinión de que sería oportuno investigar el plutonio. Fowler, que en aquella época actuaba en Wáshington como oficial británico de enlace científico, pasó la carta a Cockroft a Lawrence. Los ingleses nunca prosiguieron con la investigación de la posibilidad del plutonio debido a que concentraron todos sus hombres sobre el U-235. Chadwick, por lo menos, estaba convencido de que se habría podido fabricar una bomba de U-235 de gran poder destructivo, y todo el grupo de los británicos opinaba que existían probabilidades de realizar la separación del U-235 por difusión.

3.18. Los informes sobre la opinión británica, incluyendo los primeros informes británicos acerca de la revisión del problema, fueron conocidos por Bush y Conant oficiosamente durante el verano de 1941, mientras que el informe oficial británico del 15 de julio fué transmitido a Conant por G. P. Thompson el 3 de octubre. Como, por otra parte, la revisión británica no llegó al Comité de la Academia Nacional de Ciencias, los informes del Comité de la Academia y los informes

ingleses constituyeron evaluaciones independientes sobre las perspectivas de producir bombas atómicas.

3.19. Entre las conferencias oficiales y semioficiales surgieron discusiones mucho menos formales, una de ellas provocada por M. L. E. Oliphant, inglés, durante su visita a los Estados Unidos en el verano de 1941. Como ejemplo de tal discusión privada podemos recordar las conversaciones entre Conant, Compton y Lawrence durante la celebración del cincuentenario de la Universidad de Chicago en setiembre de 1941. Como ejemplo de tal discusión privada podemos recordar las conversaciones entre Conante, Compton y Lawrence durante la celebración del concuentenario de la Universidad de Chicago. En general, la conclusión era que el programa tenía que ser impulsado; y esta conclusión fué comunicada a Bush de muchas maneras por un gran número de personas.

3.20. Al final del año 1941, Urey y Pegram fueron enviados a Inglaterra para recibir informes directos sobre lo qué se había hecho allí. Ésta era la primera vez que algún norteamericano iba a Inglaterra por razones específicamente relacionadas con el problema del uranio. El informe preparado por Urey y Pegram confirmó y extendió las noticias que habían sido anteriormente recibidas.

SE DECIDE EXTENDER Y REORGANIZAR

3.21. Como resultado de los informes preparados por el Comité de la Academia Nacional, por los ingleses, por Urey y Pegram y en vista de la urgencia reclamada por numerosos físicos, Bush, como director de la Oficina de Investigaciones y Desarrollo de las Ciencias (de la cual forma parte), el N.D.R.C. decidió que el trabajo sobre el uranio tenía que ser impulsado con mayor energía.

3.22. Antes de que se diera a conocer el tercer informe de la Academia Nacional, y antes que Pegram y Urey visitaran Inglaterra, Bush había presentado todo el problema del uranio al presidente Roosevelt y al vicepresidente Wallace. Resumió los puntos de vista ingleses, que eran en conjunto optimistas, y subrayó la incertidumbre de las predicciones. El presidente convino en que era deseable ampliar el programa,

especial, darle una organización distinta, proporcionarle una fuente especial de recursos y efectuar un intercambio completo de informes con los ingleses. Estuvo de acuerdo en limitar las discusiones del plan general a los siguientes grupos: presidente, vicepresidente, secretario de guerra, jefe de equipo, Bush y Conant. Este grupo a menudo es mencionado como alto grupo político.

3.23. En la época de la preparación del tercer informe de la Academia Nacional, y de la vuelta de Urey y Pegram de Inglaterra, el plan general de la reorganización empezó a tomar forma precisa. El informe de la Academia era más conservador que el informe británico, como lo puso de relieve Bush en su carta del 27 de noviembre de 1941 al presidente Roosevelt. Era sin embargo, lo bastante optimista como para constituir una nueva base en qué fundar el proyecto de extender el trabajo. La organización propuesta fué anunciada en la reunión de la Sección del uranio justamente antes del ataque a Pearl Harbour, y será descripta en el capítulo V.

RESUMEN

3.24. En el mes de marzo de 1939, sólo pocas semanas antes del descubrimiento de la fisión del uranio fué atraída la atención del gobierno sobre la posible importancia militar de dicha fisión. En el otoño del año 1939 fué creado el primer Comité Gubernamental del uranio. En la primavera de 1940 fué establecido un organismo para limitar el número de artículos periodísticos y de publicaciones de especial interés en este campo. Cuando fué creado el N.D.R.C. en junio de 1940, el Comité del Uranio fué reestructurado como dependencia de aquél. Por otra parte, hasta el otoño de 1941, el gasto total fué relativamente pequeño. En el mes de diciembre de 1941, después de haber recibido el informe de la Academia Nacional y las noticias de Inglaterra, se tomó la decisión de ampliar y reorganizar el programa.

Capítulo IV

PROGRESOS HASTA DICIEMBRE DE 1941

PROBLEMAS INMEDIATOS

4.1. En el capítulo II tratamos los problemas generales que plantea la producción de una reacción para fines militares. Al comienzo del verano de 1940, los problemas de mayor importancia inmediata eran:

1) ¿Es posible encontrar alguna circunstancia en la cual puede producirse la reacción en cadena?

2) ¿Es posible separar el isótopo U-235 en grandes cantidades?

3) ¿Puede lograrse un moderador y los otros materiales en cantidades y con pureza suficientes?

A pesar de que había muchos otros problemas subsidiarios, como aparecerá en el relato de los progresos hechos en los ocho meses siguientes, estos tres problemas determinaron la orientación del trabajo.

LA REACCIÓN EN CADENA

Programa propuesto el 15 de junio de 1940

4.2. En el mes de junio de 1940, prácticamente todo el trabajo sobre la reacción en cadena fué concentrado en la Universidad de Columbia, bajo la dirección general de Pegram, y directamente dirigido por Fermi y Szilard. Se había llegado a la conclusión de que la manera más fácil de producir una re-

acción en cadena era probablemente la que utilizaba neutrones térmicos para la fusión en una mezcla heterogénea de grafito y uranio. En la primavera de 1940, Fermi, Szilard y H. L. Anderson habían mejorado la precisión de las mediciones de la sección eficaz de captura del carbono para neutrones, de la absorción de resonancia (a velocidad intermedia) de los neutrones por parte del U-238, y la reducción de velocidad de los neutrones en el carbono.

4.3. Escribía Pegram, en un memorándum a Briggs el 14 de agosto de 1940: "No es muy fácil medir estas cantidades con precisión sin hacer uso de grandes cantidades de material. El resultado de estas experiencias en la primavera de 1940 fué que no había sido demostrada definitivamente la posibilidad de una reacción en cadena, pero tampoco había sido probada definitivamente su imposibilidad. En conjunto, las indicaciones eran más favorables que cualquier conclusión que fundadamente se hubiera podido hacer partiendo de resultados anteriores".

4.4. En la reunión del 15 de junio (véase capítulo III) estos resultados fueron discutidos y se recomendó: (A) que se hiciesen ulteriores mediciones sobre las constantes nucleares, y (B) que se efectuasen experiencias sobre estructuras de carbono y uranio cuyo contenido de uranio variara entre una quinta y una cuarta parte de la cantidad estimada como crítica.

PROGRESOS HASTA EL 15 DE FEBRERO DE 1941

4.5. El informe de Pegram del 15 de febrero de 1941 muestra que la mayor parte del trabajo hecho hasta este momento era el contenido en (A), mientras que el de (B), o sea el llamado experiencia intermedia, había sido aplazado por falta de materiales.

4.6. Según el informe de Pegram, el progreso principal era el siguiente: (a) *la reducción de velocidad de los neutrones* en el grafito fué investigada estudiando la intensidad de activación de varios detectores (rodio, indio, yodo) distribuídos en varias posiciones en una columna rectangular de grafito de dimensiones $3 \times 3 \times 8$ pies, colocando en su interior la fuente de neutrones. Mediante una adecuada elección de pan-

tallas de cadmio se investigaron por separado (*) los efectos de resonancia (**) y los neutrones térmicos. Un análisis matemático, basado en la teoría de la difusión, de los datos experimentales, permitía prever que se podían esperar ciertos resultados empleando varios otros dispositivos. Estos resultados, complementados por estudios teóricos sobre la difusión de neutrones térmicos, proporcionaban una base para el futuro cálculo del número de neutrones térmicos y de resonancia que habrían sido encontrados en cada punto de la masa de grafito para una forma dada y una posición definida de la fuente cerca o dentro del grafito.

(b) *Número de neutrones emitidos en la fisión.* Los experimentos sobre neutrones cuya velocidad había sido reducida, mostraron que neutrones de energía elevada (muy veloces), como provenientes de la fisión, eran prácticamente todos reducidos a energías térmicas (bajas velocidades) después de haber atravesado 40 cm o más de grafito. Un trozo de uranio colocado en una región donde hay neutrones térmicos absorbe neutrones térmicos y —si ocurre la fisión— vuelve a emitir neutrones veloces que se distingue fácilmente de los neutrones térmicos. Mediante una serie de mediciones con y sin uranio presente y con varios detectores y absorbentes, es posible hallar el valor de la constante η, número de neutrones emitidos por neutrón térmico absorbido por el uranio. Éste no es el número de neutrones emitido por fisión, sino algo menor que este número, puesto que no toda absorción produce fisión.

(c) *Teoría de la estructura.* Se hicieron largos cálculos para hallar el número probable de neutrones que se escapan de es-

(*) La presencia de neutrones puede ser puesta en evidencia mediante cámaras de ionización o contadores, o a través de la radioactividad artificial inducida en distintas hojas de metal (véase Apéndice 1). La respuesta de cada uno de estos detectores depende de las características particulares del detector y de la velocidad de los neutrones (por ejemplo, neutrones de más o menos 1,5 volt de energía son particularmente eficientes en la activación del indio). Además, algunos materiales poseen una gran sección eficaz de absorción para neutrones de una velocidad dada (por ejemplo el cadmio para los neutrones térmicos). Así que las mediciones con distintos detectores, con o sin distintos absorbentes, proporcionan cierta indicación del número de neutrones presentes y de su distribución energética. Por otra parte, el estado de la técnica de tales mediciones no señala todavía ningún progreso.

(**) Véase la nota de pág. 88.

tructuras de varios tipos y tamaños. Este punto era fundamental en el llamado experimento intermedio mencionado en el párrafo (B).

COMIENZO DE NUEVOS PROGRAMAS

4.7. A comienzos del año 1941, el interés en el problema general de la reacción en cadena por parte de personas que actuaban aisladamente en Princeton, Chicago y California estaba orientado hacia la aprobación de ciertos proyectos en estas instituciones. Luego, el trabajo de estos grupos fué coordinado con el trabajo en la Universidad de Columbia, convirtiéndose en parte de un solo y amplio programa.

TRABAJO SOBRE LA ABSORCIÓN POR RESONANCIA (*)

4.8. En el capítulo II establecimos que hay ventajas en una estructura o "pila" en que el uranio está concentrado en fragmentos regularmente distribuídos en la matriz del moderador. Éste fué el sistema con que trabajaba el grupo de Columbia. Como ocurre a menudo, la idea básica era simple. Si el uranio y el moderador están mezclados homogéneamente, los neutrones perderán en promedio energía en pequeños saltos entre un pasaje y otro a través del uranio, así que durante su reducción hasta la velocidad térmica, la probabilidad de que pasen a través del uranio a cierta velocidad dada, por ejemplo a la velocidad que corresponde a la absorción por resonancia, es grande. En cambio, si el uranio está concentrado en trozos gruesos y a intervalos amplios en el moderador, la cantidad de energía perdida por los neutrones entre los pasajes desde un trozo de uranio a otro será grande, y la probabilidad de que alcancen un trozo de uranio con una energía igual a la

(*) El término "absorción por resonancia" se emplea para describir la absorción muy intensa de neutrones por partes del U-238 cuando las energías de los neutrones se encuentran en ciertas porciones definidas de la especie energética comprendida entre cero y 1000 electrón volt. Esta absorción por resonancia demuestra la existencia de niveles de energía nuclear que corresponden a ciertas energías. En algunos casos, el término absorción por resonancia es empleado para expresar toda la zona de energía en la vecindad de tales niveles.

energía de absorción por resonancia, es relativamente pequeña. Así, la probabilidad de absorción por parte del U-238 para producir U-239, comparada con la probabilidad de absorción como neutrones térmicos para provocar la fisión, puede ser reducida tanto como para permitir que se realice una reacción en cadena. Si se conocieran los valores exactos de las secciones eficaces de cada isótopo del uranio para cada tipo de absorción y para cualquier valor de la velocidad del neutrón, y si se tuviera un conocimiento igual del moderador, se podría calcular la "estructura óptima", esto es, el mejor tamaño, forma y separación de los trozos de uranio en la matriz del moderador. Debido a que tales datos eran conocidos sólo parcialmente, pareció correcto proceder experimentalmente con relación a ellos. Por consiguiente, se propuso que se midiera la absorción de los neutrones por parte del uranio en condiciones análogas a las esperadas en una pila de reacción en cadena que empleara grafito como moderador.

4.9. Experimentos de esta clase fueron iniciados en Columbia y continuados en Princeton en el mes de febrero de 1941. El experimento consistía en esencia en el estudio de la absorción de los neutrones en la especie de energía que va desde unos pocos miles de electrón voltios hasta una fracción del electrón voltio (energías térmicas), teniendo lugar la absorción en distintas capas del uranio o de las esferas de óxido de uranio contenidas en una pila de grafito.

4.10. En estos experimentos, la fuente de neutrones consistía de protones (acelerados por un ciclotrón) que incidían sobre un blanco de berilio. (El rendimiento resultante de neutrones era equivalente al de una fuente de radio-berilio de más o menos 3.500 Curie de intensidad). Los neutrones así producidos presentaban una distribución de velocidad grande y continua. Desde la fuente iban a un gran bloque de grafito. Colocando las diversas esferas de uranio o de óxido de uranio en el bloque de grafito en distintas posiciones, correspondientes a distancias crecientes desde la fuente, se estudiaba la absorción de neutrones de velocidades medias decrecientes hasta velocidades térmicas. Se encontró que la absorción total de neutrones por parte de tales esferas podía expresarse en términos de un efecto de "superficie" y de un "efecto de masa".

4.11. Estos experimentos que implicaban gran variedad de tamaños, densidades, y posiciones de esferas, fueron continuados hasta la primavera del año 1942, cuando la mayoría del grupo fué desplazada a Chicago. Experimentos de la misma índole fueron realizados más tarde en la Universidad de Indiana por A. C. G. Mitchell y sus colaboradores que, verificaron los datos de Princeton y en ciertos casos los corrigieron, a pesar de que éstos eran suficientemente correctos en el verano de 1941, tanto que podían ser empleados en una pila experimental y luego en una pila definitiva.

4.12. El trabajo experimental sobre la absorción por resonancia fué hecho en Princeton por R. R. Wilson, E. C. Creutz y otros colaboradores bajo la dirección general de H. D. Smyth; éstos pudieron aprovechar la ayuda constante de Wigner y Wheeler y las frecuentes reuniones con el grupo de Columbia.

LOS PRIMEROS EXPERIMENTOS INTERMEDIOS

4.13. Alrededor de julio de 1941 la primera estructura de grafito y uranio estaba lista en la Universidad de Columbia. Ésta consistía en un cubo de grafito de más o menos 8 pies de arista, que contenía más o menos 7 toneladas de óxido de uranio en recipientes de hierro distribuídos en intervalos iguales en toda la masa del grafito. Un grupo preliminar de mediciones fué efectuado sobre esta estructura en agosto de 1941. Durante los meses de septiembre y octubre fueron realizadas y estudiadas estructuras un poco mayores, y por primera vez fué desarrollado y aplicado el llamado método exponencial (descripto más adelante) para determinar el factor de multiplicación. Este trabajo fué hecho por Enrique Fermi y sus colaboradores H. L. Anderson, B. Feld, G. Weil y W. H. Zinn.

4.14. El experimento para determinar el factor de multiplicación es semejante al descripto para determinar η, número de neutrones producidos para cada neutrón térmico absorbido. Una fuente de neutrones de radio-berilio es colocada cerca del techo de la estructura, y se mide en varios puntos de ésta el número de neutrones presentes.

Estos números son luego comparados con los que se encuentran cuando no hay uranio presente en el grafito. Evidente-

mente, la absorción de neutrones por parte del U-238 para producir U-239, reduce el número de neutrones, mientras las fisiones los aumentan.

El problema es: ¿Qué efecto predomina?, o más precisamente: ¿Puede la producción de neutrones por fisión ser superior a cualquier otro proceso, distinto de la fuga o expulsión de neutrones? La interpretación de los datos experimentales en este problema crucial implicaba muchas correcciones, cálculos y aproximaciones, pero, al final, todo se reducía a un solo número, el factor de multiplicación k.

EL FACTOR DE MULTIPLICACION k

4.15. El éxito o fracaso de todo el proyecto acerca del uranio dependía del factor de multiplicación k, llamado a veces factor de reproducción. Si se podía hacer k mayor que l en un sistema práctico, el proyecto habría tenido éxito; de lo contrario, la reacción en cadena nunca habría sido más que una utopía. Esto surge claramente de la siguiente discusión aplicable a cualquier material fisionable. Supongamos que está presente un cierto número de neutrones libres en un sistema, en un determinado instante. Algunos de estos neutrones producirán fisiones y originarán así nuevos neutrones. El factor de multiplicación k es la relación entre el número de nuevos neutrones y el número de neutrones originalmente presentes. Así, por jemplo, si en una pila dada constituída por uranio, carbono, impurezas y recipientes, etc., se producen cien neutrones por fisión, algunos se escaparán, algunos serán absorbidos por el uranio sin que se produzca la fisión, algunos serán absorbidos por el carbono, por los recipientes o las impurezas, y algunos provocarán la fisión, produciendo en consecuencia nuevos neutrones (*). Si las fisiones son suficientemente numerosas y cada una suficientemente eficiente, se producirán más de 100 nuevos neutrones y el sistema presentará una reacción en cadena. Si el número de nuevos neutrones es 105, $k = 1{,}05$. Si, en cambio, el número de neutrones nuevos co-

(*) Véase el dibujo de la pág. 60.

rrespondiente a 100 neutrones presentes inicialmente es 99, $k = 0{,}99$ y no puede existir una reacción en cadena autosostenida.

4.16. Habiendo resultado que el experimento intermedio o "exponencial" descripto antes era demasiado pequeño para originar una reacción en cadena, vimos que era muy interesante saber si una pila más grande de la misma estructura reaccionaría en cadena. Esto podía determinarse calculando cuál sería el valor de k para una estructura infinitamente grande del mismo tipo. Se encuentra que, cuando un sistema que reacciona en cadena excede considerablemente su tamaño crítico —digamos dos otros veces mayor— y es rodeado por lo que se llama un reflector, el valor efectivo de k difiere muy poco de aquel tamaño infinito con tal que k sea próximo a 1,00. Por consiguiente, se acostumbra caracterizar las potencialidades de una reacción en cadena de diferentes mezclas de metal y de moderador, por medio del valor k_{∞}, constante de multiplicación obtenida cuando se supone infinito el tamaño de la pila. En otras palabras, el problema consistía en calcular cuál sería el valor de k si no se escaparan neutrones a través de los costados de la pila.

4.17. El valor de k_{∞}, como lo informó Fermi a la Sección del Uranio a fines de 1941, era más o menos 0,87. Éste estaba basado sobre los resultados del segundo experimento intermedio de Columbia. Todos estaban de acuerdo en que el factor de multiplicación podía ser aumentado si se conseguían materiales de mayor pureza, cambiando la estructura, etc. Nadie podía saber con seguridad qué habría podido hacerse superior a 1.

EXPERIMENTOS CON EL BERILIO

4.18. Aproximadamente en la misma época comenzó en Princeton el trabajo sobre absorción por resonancia; S. K. Allison, por sugestión de A. H. Compton, empezó el trabajo en Chicago con un contrato válido desde el 1º de enero de 1941 a agosto del mismo año. Los objetivos del trabajo eran investigar: (a) el aumento en la producción de neutrones cuando

la pila era encerrada en una envoltura de berilio "reflector", y (b) la sección eficaz del berilio. Fué autorizado un nuevo contrato el 18 de julio de 1941 valedero hasta el 30 de junio de 1942. Éste establecía un objetivo un poco más amplio, de investigar en general sistemas uranio-berilio-carbono. Los gastos que demandaban los trabajos eran modestos: 9.500 dólares para el primer contrato y 30.000 para el segundo.

4.19. Como ya señalamos en el capítulo II, el berilio posee buenas calidades como moderador debido a su bajo peso atómico y a su pequeña sección eficaz de absorción de neutrones; había, además, la posibilidad de que se realizara una contribución al número de neutrones por la reacción (n, $2n$) en el berilio. El valor de la sección eficaz no era conocido con precisión; además, estaba lejos de ser cierto que habría sido posible conseguir cualquier gran cantidad de berilio puro. El problema de Allison era en esencia muy parecido al problema de la Universidad de Columbia, con la diferencia de que usaba berilio en lugar de grafito. Debido a la escasez de berilio, se sugirió que se lo usara junto con grafito o con otro moderador, posiblemente como reflector.

4.20. En los experimentos de Chicago, los neutrones producidos por medio de un ciclotrón eran enviados a una pila de grafito y berilio. Allison hizo cierto número de mediciones sobre reducción de velocidad y absorción por el grafito, cuestiones que habían significado serios obstáculos en experimentos análogos realizados en Columbia. Logró finalmente conseguir bastante cantidad de berilio para hacer mediciones que mostraron que el berilio era un posible moderador, comparable con el grafito. Sin embargo, el berilio no fué empleado extensamente debido a la gran dificultad de producirlo en cantidad suficiente en las formas estructurales requeridas.

4.21. Este plan de Chicago, expuesto más arriba se convirtió en parte del plan del Laboratorio Metalúrgico establecido en la Universidad de Chicago a principios de 1942.

TRABAJO TEÓRICO

4.22. Los experimentos intermedios de la Columbia y el continuo trabajo sobre absorción de resonancia en Princeton, re-

querían una hábil interpretación teórica. Fermi elaboró la teoría de la pila "exponencial" y Wigner la teoría de la absorción de resonancia; ambos hombres de ciencia estuvieron constantemente en contacto colaborando en muchos problemas. Wheeler, de Princeton, Breit, de Wisconsin y Eckard, de Chicago —para recordar sólo unos pocos— también contribuyeron a la teoría general de la pila y a temas conexos. En suma, podemos decir que al final de 1941 la teoría general de la reacción en cadena para neutrones lentos había sido casi completamente comprendida. Las constantes numéricas y las posibilidades tecnológicas ofrecían aún, empero, bastante inseguridad.

4.23. En cuanto a la teoría de la reacción con neutrones rápidos en el U-235, también se había realizado un buen progreso. En particular se habían hecho nuevas estimaciones del tamaño crítico y se había predicho que probablemente el 10 % de la energía total podía ser liberada por explosión. Sobre esta base, un kg de U-235 sería equivalente a 2000 toneladas de TNT. Las conclusiones se consideran más abajo a propósito del informe de la Academia Nacional. Hay que recordar que intervienen dos factores: (1) qué fracción de la energía disponible de la fisión será liberada antes de que la reacción se detenga; (2) cuán destructiva será una explosión tan altamente concentrada.

TRABAJOS SOBRE PLUTONIO

4.24. En el capítulo I se hizo mención de la hipótesis según la cual, por desintegraciones beta del U-239 se formaría el elemento 94, más tarde bautizado con el nombre de plutonio, como resultado de la absorción neutrónica del U-238 y que el plutonio sería probablemente una fuente de partículas alfa de vida media larga que habría podido fisionarse al ser bombardeado por neutrones. En el verano de 1940 se le solicitó al grupo dedicado a la física nuclear de la Universidad de California con asiento en Berkeley que empleara neutrones producidos por su poderoso ciclotrón para formar plutonio y para separarlo del uranio investigando sus propiedades de fisión. Varios experimentos fueron realizados con este fin por E. Se-

gré, G. T. Seaborg, J. W. Kennedy y A. C. Wahl en Berkeley antes de 1941 y de ellos informó E. O. Lawrence al Comité de la Academia Nacional (véase más adelante) en el mes de mayo de 1941 como también en un memorándum que fué agregado al segundo informe del Comité fechado el 11 de junio de 1941. Veremos que este memorándum incluye una idea importante no subrayada expresamente en otros (§ 1.58), o sea la producción de grandes cantidades de plutonio para ser empleadas en una bomba.

4.25. Hallamos en el memorándum de Lawrence lo que sigue: "Desde el primer informe del Comité de la fisión atómica de la Academia Nacional de Ciencias, ha sido abierta una nueva posibilidad extremadamente importante para la explotación de la reacción en cadena con isótopos no separados del uranio. Experimentos realizados en el Laboratorio de Radiaciones de la Universidad de California han mostrado: (a) que como resultado de la captura de un neutrón por el uranio 238 seguido por dos transformaciones sucesivas beta, se forma el elemento 94, y además, (b) que este elemento transuránico experimenta una fisión con neutrones lentos y por consiguiente se comporta presumiblemente como uranio 235.

De acuerdo con esto parece que si se puede lograr una reacción en cadena con isótopos no separados, puede encontrarse la manera de proceder violentamente durante un lapso con el expreso propósito de producir buenas cantidades del elemento 94. Este material podía extraerse con los métodos ordinarios de la química y sería presumiblemente el equivalente del U-235 en cuanto a la reacción en cadena.

Si esto es así, se presentan las tres posibilidades siguientes:

1) El uranio 238 se volvería utilizable para la producción de la energía, aumentando así más o menos cien veces la energía atómica total obtenible a partir de una cantidad dada de uranio.

2) Empleando el elemento 94 se puede prever la preparación de pequeñas unidades de reacción en cadena a los fines de producción de energía que pesen tal vez cien libras en lugar de cien toneladas, como probablemente sería necesario para unidades que emplean el uranio natural.

3) Si se dispusiera de grandes cantidades del elemento 94,

esto sería equivalente a producir una reacción en cadena con neutrones rápidos. En una reacción de esta naturaleza la energía sería liberada con un ritmo explosivo que podríamos llamar de "super bomba".

VENENOS RADIOACTIVOS

4.26. Como dijimos antes, los fragmentos resultantes de la fisión son, en la mayoría de los casos, núcleos inestables, es decir, materiales radioactivos artificiales. Es bien sabido que las radiaciones debidas a materiales radioactivos producen efectos mortales parecidos a los efectos de los rayos X.

4.27. En una pila que reacciona en cadena, estos productos radioactivos de la fisión se originan a medida que se desarrolla la reacción. (En la práctica han sido considerados como el aspecto más peligroso de una pila en reacción). Puesto que difieren químicamente del uranio, debería ser posible extraerlos y emplearlos como una forma particularmente nociva de gas tóxico. Esta idea fué mencionada en un informe de la Academia Nacional (véase párrafo 4.48), y fué desarrollada en un informe escrito el 10 de diciembre de 1941 por E. Wigner y H. D. Smyth, quienes llegaron a la conclusión de que los productos de la fisión producidos en una pila de 100.000 kw que reaccionara en cadena durante un día podían ser suficientes para hacer inhabitable una superficie muy extensa.

4.28. Wigner y Smith no recomendaron el empleo de venenos radioactivos ni este empleo fué seriamente propuesto por las autoridades responsables, pero fué considerada seriamente la posibilidad de que los alemanes pudiesen hacer uso imprevisto de venenos radioactivos, y en consecuencia se planearon medidas defensivas.

SEPARACIÓN DEL ISÓTOPO

Separación en pequeña escala mediante el espectrógrafo de masa

4.29. En el capítulo I mencionamos la atribución al isótopo U-235 de la propiedad, experimentalmente establecida, de producir la fisión neutrónico-térmica del uranio. Esto fué

hecho separando parcialmente diminutas cantidades de los isótopos del uranio en el espectrógrafo de masa de A. O. Nier y estudiando luego las propiedades nucleares de las muestras. Otras pequeñas muestras fueron proporcionadas por Nier en el verano de 1941 y estudiadas por N. P. Heydenburg y otros en el laboratorio de M. A. Tuve, en el Departamento de Magnetismo Terrestre del Instituto Carnegie de Wáshington. Pero los resultados de estos experimentos sólo podían considerarse provisionales, y era deseable evidentemente emprender otros estudios más completos sobre muestras completamente puras.

4.30. La necesidad de muestras de U-235 más grandes, estimuló a E. O. Lawrence en Berkeley, a trabajar sobre la separación electromagnética. Tuvo un éxito notable, y el 6 de diciembre de 1941 informó que había logrado depositar en una hora un microgramo de U-235 del cual había sido eliminado una gran parte de U-238.

4.31. Anteriormente, en una reunión del Comité del Uranio, Smyth de Princeton, había planteado el problema de la posible separación en gran escala de isótopos por medios electromagnéticos, pero se le había argüído que este punto ya había sido investigado y que se lo consideraba un camino imposible. A pesar de esto, Smyth y Lawrence en una reunión casual en octubre de 1941 discutieron este problema, y quedaron de acuerdo en admitir su posibilidad. Smyth planteó otra vez el problema en una reunión del Comité del Uranio el 6 de diciembre, y en la reunión siguiente (18 de diciembre de 1941) hubo una discusión general sobre métodos electromagnéticos en gran escala en relación con el informe de Lawrence sobre sus resultados ya consignados. De las consecuencias de esta discusión, se informa en el capítulo XI.

MÉTODOS DE CENTRIFUGACIÓN Y DE DIFUSIÓN GASEOSA

4.32. Aunque hemos aclarado que la separación entre el U-235 y el U-238 puede ser fundamental para el éxito del proyecto, muy poco se ha dicho sobre el trabajo en este campo. Tal trabajo había ido adelantando desde el verano del año 1940 bajo la completa dirección de H. C. Urey de la Universidad de Columbia. Puesto que esta parte del trabajo sobre

el uranio no fué muy afectada por la reorganización de diciembre de 1941, reservamos una relación detallada del trabajo en los capítulos IX y X. Aquí presentamos sólo un resumen del mismo.

4.33. Después de haber hecho cuidadosos exámenes y haber efectuado una considerable cantidad de experimentos sobre otros métodos, se llegó a la conclusión de que los dos métodos más promisorios para separar grandes cantidades de U-235 del U-238 eran los de emplear las centrífugas y la difusión a través de barreras porosas. En la centrífuga, las fuerzas que obran sobre los dos isótopos son ligeramente distintas por sus diferencias de masa. En el caso de las barreras porosas, las proporciones de difusión son ligeramente distintas para los dos isótopos, también a causa de sus diferencias de masa. Ambos métodos requerían uranio en forma gaseosa, lo que constituía una inmediata y grave limitación, puesto que el único compuesto gaseoso adecuado del uranio entonces conocido, era el hexafluoruro de uranio. En cada método el caudal de enriquecimiento esperado en una sola unidad de producción o "etapa" era muy pequeño; esto indicaba que serían necesarias muchas etapas sucesivas para obtener un alto grado de enriquecimiento.

4.34. A fines de 1941, cada método había sido demostrado experimentalmente en principio; es decir, los separadores de una sola etapa habían efectuado el enriquecimiento en escala de laboratorio hasta el grado teóricamente previsto. K. Cohen, de la Columbia, y otros, desarrollaron la teoría para las unidades únicas y para las series o "cascadas" de unidades que podían necesitarse. Así que era posible estimar que se necesitaría más o menos 5.000 etapas para un tipo de sistema de difusión y que se requeriría un área total de muchos acres de barreras de difusión en una instalación de separación de un kg de uranio por día. El costo correspondiente fué estimado en 10 millones de dólares. Por el método de las centrífugas, el número de etapas habría sido menor, pero se predijo que una producción de esta naturaleza mediante centrífugas habría requerido 22.000 centrífugas ultra-rápidas impulsadas por separado, cada una de las cuales debía tener tres pies de largo, a un costo equivalente.

4.35. Desde luego que las estimaciones de costo no podían ser exactas, puesto que los problemas tecnológicos estaban casi por completo sin solución, pero estas estimaciones previas referentes al tamaño y al costo de la instalación, ponían de manifiesto la magnitud de la empresa.

DIFUSIÓN TÉRMICA EN LOS LÍQUIDOS

4.36. En septiembre de 1940, P. H. Abelson sometió a Briggs un memorándum de 17 páginas en que sugería la posibilidad de separar los isótopos del uranio por medio de la difusión térmica en el hexafluoruro de uranio líquido. R. Gunn, del Laboratorio Naval de Investigaciones, estaba también muy interesado en el problema del uranio, y fué nombrado miembro del Comité del Uranio al ser éste reorganizado bajo el N. D. R. C. en el verano de 1940. Como resultado de la sugestión de Abelson y del interés de Gunn, el trabajo sobre la difusión térmica se inició en el National Bureau of Standards. Este trabajo fué costeado por el Departamento Naval y en 1940 fué trasladado al Laboratorio Naval de Investigaciones, donde siguió todavía bajo la dirección de Abelson.

4.37. Hablaremos con más detalle del trabajo sobre la difusión térmica en un capítulo posterior, pero queremos señalar aquí que ya se obtuvieron resultados interesantes a fines del año 1941 y que en enero de 1942, empleando una sola columna de separación, se obtuvo un factor de separación comparable o quizá superior al obtenido en la época de los ensayos preliminares con los métodos de difusión y centrifugación.

LA PRODUCCIÓN DE AGUA PESADA

4.38. En el capítulo II hicimos notar que el deuterio presentaba ventajas como moderador debido a su baja absorción y a su buena propiedad de descelerar, pero era poco práctico debido a su escasez. Los resultados experimentales obtenidos en Berkeley demostraron que la sección eficaz de absorción del deuterio para neutrones era casi nula; estos hechos volvieron a dar interés al deuterio como moderador. Ordinaria-

riamente se consideraba que el deuterio debía ser combinado con el oxígeno debido a que éste presenta un coeficiente muy bajo de absorción para los neutrones; así que un material muy conveniente es el agua pesada. En febrero de 1941, bajo la dirección de H. C. Urey (contratado por la OSRD) se empezó el trabajo en la Columbia sobre los métodos posibles para concentrar agua pesada en grandes cantidades. A comienzos de 1941, R. H. Fowler, inglés, informó que el grupo británico estaba muy interesado en un moderador de deuterio bajo forma de agua pesada, y su convencimiento de que sería posible realizar una reacción en cadena en unidades relativamente pequeñas de uranio y agua pesada.

4.39. Urey y A. von Grosse habían considerado ya la posibilidad de concentrar el agua pesada mediante una reacción catalítica de intercambio entre hidrógeno gaseoso y agua líquida. Este proceso depende del hecho de que, cuando se ha establecido el equilibrio isotópico entre gas de hidrógeno y agua, el agua tiene una concentración de deuterio 3 ó 4 veces mayor de la que puede contener el gas hidrógeno. Durante el año 1941, esta reacción de intercambio entre agua e hidrógeno fué investigada en la Universidad de Columbia y en el Laboratorio Químico Frick de Princeton, y se hizo un gran trabajo para desarrollar métodos tendientes a producir en gran escala materiales adecuados como catalizadores de la reacción.

4.40. El desarrollo ulterior del trabajo y otros métodos de producir agua pesada se exponen en el capítulo IX. Como los otros trabajos sobre separación de isótopos en la Columbia, esté trabajo casi no fué afectado por la reorganización de diciembre de 1941. Se lo menciona aquí en su forma primitiva para indicar que todos los principales caminos para abordar el problema ya estaban en curso de investigación en el año 1941.

PRODUCCIÓN Y ANÁLISIS DE MATERIALES

4.41. A fines de 1941 no se habían realizado muchos progresos en la producción de los materiales necesarios para un

sistema que reaccionara en cadena. El National Bureau of Standards y el grupo de la Universidad de Columbia estaban en contacto con la Metal Hydrides Company de Beverly, Massachussetts. Esta compañía estaba produciendo algo de uranio en polvo, pero los esfuerzos para aumentar su producción y para fundir en lingotes el metal en polvo no habían tenido mucho éxito.

4.42 Asimismo, no se había encontrado un método satisfactorio para obtener grandes cantidades de grafito altamente purificado. El grafito usado en Columbia lo suministraba la Compañía Estadounidense de Saginaw, Michigan. Era éste un producto purísimo para uso comercial, pero contenía más o menos una parte sobre 500.000 de boro, lo que era un serio inconveniente.

4.43. Debido al gran interés de Allison había sido investigada la posibilidad de aumentar la producción de berilio hasta que se llegó a la conclusión de que era difícil y costoso pero probablemente posible.

4.44. Aunque pocos progresos se habían hecho en la producción, muchos en cambio habían sido realizados en los análisis. El desarrollo de métodos de análisis químicos suficientemente cuidadosos de los materiales empleados había sido un problema de primera magnitud en toda la historia del plan, aunque a veces había pasado a un plano secundario debido a problemas mucho más importantes que se habían presentado. Durante este período C. J. Rodden y otros, del National Bureau of Standards estaban encargados de los análisis; H. T. Beams, de la Columbia, también cooperaba. Durante el año 1942, muchos otros grupos habían puesto en marcha secciones analíticas que continuamente habían estado activas desde entonces.

4.45. Resumiendo, a fines de 1941 no podía asegurarse que la producción de los materiales en cantidad y pureza suficientes fuese imposible, pero los problemas estaban lejos de ser resueltos.

sistema que reaccionara en cadena. El National Bureau of Standards y el grupo de la Universidad de Columbia estaban en contacto con la Metal Hydrides Company de Beverly, Massachussetts. Esta compañía estaba produciendo algo de uranio en polvo, pero los esfuerzos para aumentar su producción y para fundir en lingotes el metal en polvo no habían tenido mucho éxito.

4.42 Asimismo, no se había encontrado un método satisfactorio para obtener grandes cantidades de grafito altamente purificado. El grafito usado en Columbia lo suministraba la Compañía Estadounidense de Saginaw, Michigan. Era éste un producto purísimo para uso comercial, pero contenía más o menos una parte sobre 500.000 de boro, lo que era un serio inconveniente.

4.43. Debido al gran interés de Allison había sido investigada la posibilidad de aumentar la producción de berilio hasta que se llegó a la conclusión de que era difícil y costoso pero probablemente posible.

4.44. Aunque pocos progresos se habían hecho en la producción, muchos en cambio habían sido realizados en los análisis. El desarrollo de métodos de análisis químicos suficientemente cuidadosos de los materiales empleados había sido un problema de primera magnitud en toda la historia del plan, aunque a veces había pasado a un plano secundario debido a problemas mucho más importantes que se habían presentado. Durante este período C. J. Rodden y otros, del National Bureau of Standards estaban encargados de los análisis; H. T. Beams, de la Columbia, también cooperaba. Durante el año 1942, muchos otros grupos habían puesto en marcha secciones analíticas que continuamente habían estado activas desde entonces.

4.45. Resumiendo, a fines de 1941 no podía asegurarse que la producción de los materiales en cantidad y pureza suficientes fuese imposible, pero los problemas estaban lejos de ser resueltos.

INTERCAMBIO DE INFORMACIONES CON LOS INGLESES

4.46. Antes del otoño de 1941 se había producido algún intercambio de informaciones con los ingleses y alguna discusión con personalidades científicas británicas que estaban dedicadas en los Estados Unidos a otros asuntos. En setiembre de 1941 se decidió que Pegram y Urey fueran a Inglaterra en busca de noticias de primera mano. Éstos cumplieron su viaje en la primera semana de diciembre de 1941.

4.47. En general, el trabajo en Inglaterra había seguido muy de cerca la misma trayectoria que en este país. Al igual que en el problema de la reacción en cadena su atención había sido atraída sobre el agua pesada como moderador en lugar del grafito; en cuanto a la separación de los isótopos, habían trabajado intensamente sobre procesos de difusión, estudiando inclusive la teoría general de las cascadas. En realidad, la importancia principal de esta visita y de otros intercambios durante el verano de 1941 no estriba en la búsqueda de datos científicos precisos, sino en impresiones científicas generales. Los ingleses, y en particular J. Chadwick, estaban convencidos de que podía lograrse una reacción en cadena en el U-235. Ellos sabían que en Noruega se estaban produciendo muchos kg de agua pesada por día, y que Alemania había ordenado la elaboración de considerables cantidades de parafina en que se emplease hidrógeno pesado; resultaba difícil imaginar un empleo de estos materiales que no fuese una aplicación al problema del uranio. Los británicos temían que si los alemanes hubieran logrado bombas atómicas antes que los aliados, la guerra podía terminarse en pocas semanas. La sensación de urgencia que Pegram y Urey trajeron de vuelta, tuvo una gran importancia.

EL INFORME DEL COMITÉ DE LA ACADEMIA NACIONAL

4.48. La tarea del Comité de la Academia Nacional ha sido mencionada en el capítulo III. El primer informe del Comité, en mayo de 1941, hacía mención: (a) de los venenos radioactivos, (b) de la energía atómica y (c) de las bombas atómicas, pero se daba el máximo peso a la energía. El segundo

informe subrayaba la importancia de los nuevos resultados sobre el plutonio, pero no consignaba expresamente los empleos militares a que el proceso de fisión habría podido llevar. Ambos informes aconsejaban impulsar más vigorosamente y con urgencia este plan.

4.49. El tercer informe (6 de noviembre de 1941) trataba especialmente las "posibilidades de una reacción explosiva por fisión con el U-235". Aunque ninguno de los dos primeros informes de la Academia Nacional indicara la posibilidad de que el uranio fuese de importancia decisiva en la presente guerra, se subrayaba esta posibilidad en el tercer informe. Nada mejor que transcribir una parte del mismo.

"Desde nuestro último informe, los progresos en lo referente a la separación de los isótopos del uranio han sido tales que creemos urgente considerar: (1) la probabilidad de éxito en la tentativa de producir una bomba de fisión, (2) el efecto destructivo que debemos esperar de tal bomba, (3) prever el tiempo necesario para desarrollar y completar su producción, y (4) estimar el costo que demanda.

"1. *Condiciones para la bomba por fisión. Una bomba por fisión de poder destructivo superlativo resultará de juntar rápidamente una masa suficiente del elemento U-235.* Esto parece ser tan seguro como puede serlo cualquier predicción no probada basada sobre la teoría y la experiencia. Nuestros cálculos indican además que las masas requeridas pueden ser juntadas con suficiente rapidez para que la reacción llegue a ser eficiente...

"2. *Efecto destructivo de las bombas por fisión.* (a) *Masa de la bomba. La masa de U-235 requerida para producir una fisión explosiva en condiciones apropiadas, difícilmente puede ser inferior a 2 kg o superior a 100 kg.* Estos amplios límites reflejan cabalmente la incertidumbre experimental en la sección eficaz de captura del U-235 para neutrones veloces... (b) *Energía liberada por una fisión explosiva.* Cálculos para el caso de masas adecuadamente dispuestas en el instante inicial, muestran que debe ser liberada entre el 1 y el 5 % de la energía de fisión del uranio en una explosión por fisión. Esto significa de 2 a 10 $\times$ 10^8 kilocalorías por kg de U-235. *La*

Capítulo V

HISTORIA ADMINISTRATIVA DURANTE EL PERÍODO 1942 - 1945

5.1. En el capítulo III hemos revisado la historia administrativa de los trabajos sobre el uranio hasta diciembre de 1941. El capítulo IV se refiere al progreso científico del trabajo hasta la misma fecha. El presente capítulo describe la reorganización que tuvo lugar en el mes de diciembre de 1941 y varios cambios que se realizaron después.

REORGANIZACIÓN DE LA SECCIÓN DEL URANIO DEL N D R C TRANSFERENCIA AL O S R D

5.2. El nuevo plan del programa de bomba atómica de uranio requería dos importantes decisiones. Estas decisiones fueron tomadas por Vannevar Bush, director de la Oficina Científica de Investigación y Desarrrollo (que incluía el N D R C), después de haber conferenciado con varios hombres de ciencia y administradores. (Véase capítulo III). Las decisiones eran: primera, que la posibilidad de alcanzar bombas atómicas que se pudieran usar en la presente guerra, fuera suficientemente grande para justificar un esfuerzo total en su desarrollo; segunda, que la organización existente, o sea la Sección del Uranio de la N D R C (conocida como la Sección S-1 y constituída por L. J. Briggs, presidente; G. B. Pegram, vicepresidente; H. T. Wensel, ayudante técnico; S. K. Allison, J. W. Beams,

G. Breit, E. U. Condon, R. Gunn, H. D. Smyth y H. C. Urey), no estaba organizada en forma adecuada para tal esfuerzo.

5.3. En una reunión del Comité Nacional de Investigaciones para la Defensa, el 28 de noviembre de 1941, el doctor Bush explicó por qué creía que hubiera sido deseable colocar el programa del uranio fuera del N D R C. Los miembros del N D R C estuvieron de acuerdo en transferirlo. Por lo tanto, el N D R C, como organización, no tuvo ulteriores relaciones con el programa del uranio, que luego fué administrado directamente por algún tiempo por el O S R D a través de una Sección S-1 del O S R D, y más tarde por medio de un Comité Ejecutivo S-1 O S R D.

5.4. En la reunión de la Sección S-1 del O S R D del 6 de diciembre de 1941, J. B. Conant, hablando en representación de Bush, anunció el esfuerzo "total" propuesto y la reorganización del grupo. La misma Sección S-1 no había sido formalmente consultada acerca de la reorganización propuesta, pero no cabía duda alguna de que la mayor parte de los miembros se mostraban muy favorables a las nuevas sugestiones. Los miembros de la reorganizada Sección S-1 eran los siguientes: L. B. Conant, en representación de V. Bush; L. J. Briggs, presidente; G. B. Pegram, vicepresidente; A. H. Compton, E. O. Lawrence, H. C. Urey, estos tres últimos jefes de plan; E. V. Murphree, presidente de la Sección Proyectos organizada por separado; H. T. Wensel, ayudante técnico; S. K. Allison, J. W. Beams, G. Breit, E. U. Condon y H. D. Smyth.

FORMACIÓN DEL CONSEJO DE PLANEAMIENTO

5.5. En la época de la reorganización de la Sección S-1, Bush fundó también un Consejo de Planeamiento para que se hiciera cargo de los aspectos técnicos y de la realización del trabajo para el suministro de los materiales, para la construcción de una unidad industrial experimental y para las instalaciones de plantas de producción a todo vapor. Este Consejo de Planeamiento estaba integrado por E. V. Murphree (presidente), W. K. Lewis, L. W. Chubb, G. O. Curme, Jr., y P. C. Keith.

ATRIBUCIONES DEL CONSEJO DE PLANEAMIENTO Y DE LA SECCIÓN OSRD

5.6. Se convino que los contratos para las distintas partes científicas del programa serían encomendados a Bush, no por medio de la entera Sección S-1, sino por intermedio de Briggs y Conant después de haber conferenciado con los jefes de programa interesados, y que se encomendarían a Bush los contratos de ingeniería por medio del Consejo de Planeamiento. (Los contratos que habían sido hechos en nombre de la anterior Sección del Uranio habían sido administrados a través del NDRC). Los contratos para el desarrollo de los procesos de difusión y centrifugación habían sido encomendados al Consejo de proyectos, que también se hacía cargo del programa de la producción de agua pesada. Bush estableció que el Consejo de Planeamiento "se encargaría de examinar lo que hemos planeado, y sobre esto proceder a la etapa sucesiva lo más rápidamente posible".

5.7. Los aspectos científicos del trabajo fueron separados de las fases de producción y de realización técnica. Los jefes de programa —H. C. Urey, E. O. Lawrence y A. H. Compton—, eran encargados de los aspectos científicos. Al comienzo se propuso que Urey se encargaría de la separación de los isótopos empleando métodos de difusión y centrifugación, y del trabajo de investigación para la producción de agua pesada. Lawrence fué encargado de la producción inicial de pequeñas muestras de elementos fisionables, de los métodos de producir cantidades por separación electromagnética y de cierto trabajo experimental relacionado con las propiedades del núcleo de plutonio. Compton fué encargado de los estudios físicos fundamentales de la reacción en cadena y de las mediciones de las propiedades nucleares relacionadas especialmente con la reacción en cadena explosiva. En segundo término fué autorizado a explorar también la posibilidad de producir plutonio en cantidades útiles por el método de la reacción en cadena controlada. Se entendía, sin embargo, que la división de las responsabilidades tenía que ser mejor precisada en conferencias posteriores. (Los documentos de este período no siempre dan una descripción adecuada de lo que estaba en

las mentes de las personas participantes. Debido a requisitos de seguridad, lo atinente a la importancia del plutonio y aun a la bomba misma, era a menudo omitido por completo).

5.8. El efecto de la reorganización fué poner la dirección de los proyectos en las manos de un pequeño grupo constituído por Bush, Conant, Briggs, Compton, Urey, Lawrence y Murphree. Desde el punto de vista de la teoría, Compton, Lawrence, Urey y Murphree sólo asumían la responsabilidad del programa de sus respectivas secciones. Cada uno se encontraba con Conant y Briggs u ocasionalmente con Bush, para discutir sus problemas específicos, o bien el programa total.

REUNIÓN DEL DIRECTORIO POLITICO - APROBACIÓN DE LA REORGANIZACIÓN

5.9. El directorio político formado por el vicepresidente Henry A. Wallace, el secretario de Guerra, Henry L. Stimson, y el doctor V. Bush, se reunió el 16 de diciembre de 1941. Estaban ausentes el general George C. Marshall y el doctor J. B. Conant, también miembros del directorio; el señor H. L. Smyth dirigía la Oficina del Presupuesto. Bush hizo una exposición de la reorganización que se estaba desarrollando, y sus planes fueron aprobados. En un memorándum a Conant, donde se describía la reunión, Bush escribió: "El grupo ha comprendido definitivamente que el O S R D debe apurar todo lo que pueda los problemas físicos fundamentales, el planeamiento técnico y en particular la construcción de unidades experimentales". Bush estimó que el costo de este aspecto del trabajo sería de cuatro o cinco millones de dólares, y estableció que el ejército habría tenido que hacerse cargo de la instalación definitiva cuando su construcción fuese empezada, esto es, presumiblemente cuando fuesen terminadas las unidades experimentales. Sugirió además que se dedicara una suma para adiestrar oficiales del ejército y familiarizarlos con el carácter general del problema del uranio. En esta reunión se aclaró que las relaciones internacionales quedaban en manos del presidente, en tanto que Bush sólo era responsable de las relaciones técnicas.

REUNION DEL 18 DE DICIEMBRE DE 1941 DE LA SECCION S-1 DEL O S R D

5.10. El 18 de diciembre de 1941 se efectuó una reunión de la S-1 reorganizada. Conant estaba presente y discutió la nueva política que exigía un esfuerzo total. Éste subrayó que tamaño esfuerzo sólo se justificaba por el valor militar de la bomba atómica, y que debía concentrarse toda la atención en el desarrollo de ésta. Toda la reunión estuvo penetrada de una atmósfera de entusiasmo y de urgencia. Fueron propuestos y discutidos varios métodos de separación electromagnética y se recomendaron nuevos contratos.

REUNIÓN DE LA SECCION S-1 DEL O S R D DEL 16 DE ENERO DE 1942

5.11. El 16 de enero de 1942 se efectuó otra reunión de la Sección S-1 del O S R D. Se discutieron los diversos métodos de producción, y se hicieron estimaciones como si cada método pudiera proporcionar resultados. Estas previsiones eran entonces sólo suposiciones, puesto que en aquel tiempo la información científica disponible era muy incompleta y el problema de aplicar los datos existentes para la construcción y funcionamientos de plantas de producción apenas había sido abordado.

REAJUSTE DEL TRABAJO A COMIENZOS DE 1942

5.12. A mediados del mes de enero, Compton decidió concentrar el trabajo del cual se había hecho cargo en la Universidad de Chicago. El grupo de la Columbia bajo la dirección de Enrique Fermi con su material acumulado y su equipo, y el grupo de Princeton, que había estado estudiando la absorción de resonancia fueron enviados a Chicago durante la primavera. Algunos grupos más pequeños de otras partes siguieron trabajando bajo la dirección de Compton. La investigación sobre la separación electromagnética en gran escala fué apresurada bajo la dirección de Lawrence en la Universidad de California en Berkeley y un proyecto de separación con él relacionado se empezó en Princeton. Proseguía en la Columbia

la investigación y el desarrollo sobre el proceso de difusión y sobre la producción de agua pesada con Urey, bajo la inspección general de Murphree; en la Universidad de Virginia proseguía el trabajo de centrifugación bajo la dirección Beams, mientras que el trabajo de centrifugación de la Columbia fué trasladado a los laboratorios de la Standard Oil Development Co. en Bayway, Nueva Jersey.

INFORME DE BUSH AL PRESIDENTE EL 9 DE MARZO DE 1942

5.13. En un informe de fecha 20 de febrero de 1942, Conant recomendaba que todas las fases del trabajo fueran impulsadas por lo menos hasta el primero de julio de 1942. Análogamente, el 9 de marzo de 1942 el doctor Bush envió al presidente un informe que reflejaba el optimismo general pero por su parte subrayaba el carácter de tanteo de las conclusiones. Su informe contemplaba la terminación del proyecto para el año 1944. Además, el informe sugería que el ejército entrara a trabajar durante el verano de 1942 para la construcción de plantas en gran escala.

REVISIÓN DEL PROGRAMA POR CONANT

5.14. Todo el programa del agua pesada se hallaba bajo revisión en marzo y abril de 1942. Las revisiones empezaron después de una visita a los Estados Unidos en febrero y marzo de 1942 de F. Simon, H. Halban y W. A. Akers de Inglaterra. Conant en un memorándum del 1º de abril de 1942, enviado a Bush, hacía un examen de la situación y relataba las conversaciones con compton y Briggs. Su informe puntualizaba que se habrían necesitado enormes cantidades de agua pesada para una instalación de producción de plutonio que empleara como moderador agua pesada en lugar de grafito. Por esta razón se declaró en contra de la sugestión de instar a Halban para que trajera de su país los 165 litros de agua pesada que tenía entonces en Inglaterra.

5.15. Conant, en un memorándum escrito a Bush el 14 de mayo de 1942 (poco antes de la proposición de reunión de los jefes de programa) estimaba que se disponía de 5 métodos

de separación o producción cuyas probabilidades de éxito eran más o menos las mismas: la centrifugación, la difusión, los métodos electromagnéticos de separación del U-235; y los métodos de producción de plutonio por pila de uranio-grafito y uranio-agua pesada. Todos fueron considerados casi listos para la construcción de una unidad experimental y tal vez también para un proyecto preliminar de fábrica de producción. Si se hubiera tenido que desarrollar los métodos hasta la etapa de producción habría sido necesario contar con un presupuesto de 5 millones de dólares. Aunque no se podían aun estimar con precisión los méritos relativos de los diferentes métodos, era de prever que alguno demostraría ser más rápido y más eficiente que otros. Se temía, sin embargo, que la eliminación de uno cualquiera de los métodos pudiera provocar un atraso importante. Se pensaba que los alemanes podían hallarse un poco más adelantados que los Estados Unidos en un programa similar.

5.16. Conant subrayó un problema que había sido de importancia decisiva en todo el desarrollo del proyecto del uranio. El problema era si las bombas atómicas habrían sido un arma decisiva o sólo un arma suplementaria. Si hubieran sido decisivas, virtualmente la cantidad de sacrificio y de dinero que requería el trabajo sería ilimitada. Pero nadie sabía qué eficiencia podrían tener las bombas atómicas.

CAMBIO DE LA SECCIÓN S-1 DEL O R S D AL COMITÉ EJECUTIVO DE LA S-1 DEL O S R D

5.17. En el mes de mayo de 1942, Conant sugirió a Bush que en lugar de instar individualmente a los miembros de la Sección a discutir sus propias bases del trabajo con Conant y Briggs, la Sección S-1 del O S R D tenía que reunirse para efectuar discusiones generales sobre el programa entero. Bush contestó liquidando la Sección S-1 del O S R D y substituyéndola con el Comité ejecutivo de la S-1 del O S R D constituído por las siguientes personas: J. D. Conant, presidente, L. J. Briggs, A. H. Compton, E. O. Lawrence, E. V. Murphree, H. C. Urey; H. T. Wensel y I. Stewart fueron elegidos para participar en el Comité, respectivamente como ayudante técnico y secretario.

5.18. Los siguientes miembros de la anterior Sección S-1 del O S R D fueron nombrados asesores del nuevo Comité: S. K. Allison, J. W. Breams, G. Breit, E. U. Condon y H. D. Smyth.

5.19. Las funciones del nuevo Comité ejecutivo de la S-1 del O S R D eran: (a) informar sobre el programa y el presupuesto para los 8 meses sucesivos y para cada método. (b) Recomendar proposiciones sobre cuántos programas podían ser llevados adelante. (c) Recomendar proposiciones sobre cuáles partes del programa tenían que ser eliminadas.

5.20. Se propuso que las decisiones, acerca de las tareas de la política del S-1 O S R D y acerca de la forma de hacer contratos, fueran tomadas por votación del Comité. Conant se abstenía de votar excepto en el caso de paridad. Aun cuando Bush tenía la autoridad de establecer las directivas del O S R D y de administrar los fondos de la O S R D, él como de costumbre seguía las proposiciones del Comité ejecutivo del S-1.

INFORME DE BUSH Y CONANT AL PRESIDENTE DEL 17 DE JUNIO DE 1942

5.21. El 13 de junio de 1942 Bush y Conant enviaron al vicepresidente Henry A. Wallace, a Henry L. Stimson, secretario de Guerra, y al general George C. Marshall, jefe de la plana mayor, un informe recomendando planes detallados para la expansión y continuación del programa de la bomba atómica. Los tres informes fueron aprobados. El 17 de junio de 1942 Bush envió el informe al presidente que también lo aprobó. El informe, que es demasiado extenso para transcribirlo íntegramente, contenía cuatro partes principales que rezaban así: (a) El estado de las investigaciones tal como había sido avaluada por los científicos responsables; (b) Proposiciones de los jefes de programa y del Consejo de Planeamiento; (c) Comentarios de Bush, Conant, y del mayor general W. D. Styler; (d) Proposiciones de Bush y Conant. Podemos resumir los párrafos (a) y (c) como sigue:

(a) *Situación del Programa.* (1) Resultaba claro que una cantidad de U-235 o de plutonio consistente en cierto número

de kg habría constituído un explosivo tal que su explosión habría sido equivalente a varios millares de toneladas de T N T y que tamaña explosión se podía provocar en el instante deseado. (2) Era claro que existían 4 métodos para preparar material fisionable y que todos estos métodos parecían realizables; pero no era posible establecer en forma concluyente que uno cualquiera de éstos fuera superior a los otros. (3) Era claro que plantas de producción de tamaño considerable podían ser proyectadas y construídas. (4) Parecía posible que contando con fondos y tiempo adecuados, la instalación a pleno rendimiento habría podido ponerse en marcha con bastante anticipación como para tener importancia militar.

(c) *Comentarios de Bush, Conant, y del general Styer.* Ciertas recomendaciones habían sido hechas por Lawrence, Urey, Compton, y Murphree. Estas recomendaciones habían sido revisadas por Bush, Conant y el general Styer (que había recibido instrucciones del general Marshall de seguir el desarrollo del programa) y sus comentarios acerca del mismo eran los siguientes: (1) Si los cuatro métodos de separación resultaran susceptibles de una aplicación satisfactoria a juicio del grupo científico competente, era muy posible que el objetivo deseado fuese alcanzado por el enemigo si se dejaba un tiempo suficiente. (2) El programa, tal como había sido propuesto no podía ser desarrollado rápidamente sin tropezar con otros importantes puntos como los relacionados con el personal científico y con el material crítico. Había que elegir entre el resultado militar que parecía alcanzable y ciertas otras actividades de guerra que parecían constituir un obstáculo. (3) Resultaba inseguro en aquella época, debido a la naturaleza precursora de toda la empresa, concentrar los medios para lograr el resultado en un solo sentido. (4) Sin embargo resultaba mejor proceder, para empezar, en aquellas fases del programa que parecían menos incompatibles con otras actividades importantes de guerra. El trabajo en otras fases del programa había podido ser impulsado después de haber resuelto los problemas de interferencia.

5.22. El 13 de julio de 1942 el informe al presidente y la carta de Bush que lo acompañaba, fechada el 17 de junio de 1942, fueron devueltos a Bush con la firma de aprobación del

presidente. Una copia del informe fué luego enviada por Bush al general Styer el 19 de junio de 1942.

ELECCION DEL CORONEL J. C. MARSHALL

5.23. El 18 de junio de 1942 el coronel J. C. Marshall, del cuerpo de ingenieros, recibió órdenes del jefe de ingenieros de formar una nueva dependencia en este cuerpo para proseguir un trabajo especial (bombas atómicas) que le había sido encomendado. La dependencia fué llamada dependencia Manhattan y fué creada oficialmente el 13 de agosto de 1942. El trabajo a que se dedicaba fué llamado, por razones de seguridad, "Proyecto D S M" (Desarrollo de Materiales Sintéticos).

ELECCIÓN DEL GENERAL L. R. GROVES

5.24. El 17 de setiembre de 1942 el secretario de Guerra encargó al general de brigada L. R. Groves, del cuerpo de ingenieros la dirección completa de todas las actividades del ejército relacionadas con el proyecto de D S M.

COMITÉ DE POLITICA MILITAR - FUNCIONAMIENTO DE LOS COMITÉS DEL O S R D

5.25. El 23 de setiembre de 1942 tuvo lugar una conferencia entre las personas que el presidente había designado para determinar las directivas generales del proyecto y ciertas otras. Los presentes eran: el secretario de Guerra Henry L. Stimson, George C. Marshall, jefe de la plana mayor, el doctor J. B. Conant, el doctor V. Bush, el mayor general Brehon Sommervell, el mayor general V. Styer y el general de brigada L. R. Groves. (El vicepresidente Henry A. Wallace no pudo asistir). Fué nombrado el Comité Directivo militar formado por el doctor V. Bush como presidente, con el doctor J. B. Conant como substituto, el mayor general W. D. Styer y el almirante W. R. Purnell. El general Groves fué designado para reunirse con el Comité y con funciones de oficial ejecutivo, a fin de proseguir las directivas que habían sido establecidas. Los deberes de este Comité eran planear las directivas

militares en todo lo relacionado con los materiales, investigaciones y desarrollo, producción, estrategia y táctica y someter informes al grupo directivo nombrado por el presidente.

5.26. El nombramiento del Comité Directivo Militar fué aprobado por el Comité de la Junta de Nuevas Armas, establecido por la Junta de los Jefes de Equipo de los Estados Unidos y constituído por el doctor V. Bush, el almirante W. R. Purnell y el general de brigada R. G. Moses.

5.27. La creación del Comité Directivo Militar en efecto ponía todas las fases del Proyecto D. S. M. bajo el control del doctor Bush, del doctor Conant, general Styer, almirante Purnell y general Groves.

5.28. El Comité Ejecutivo del S-1 O S R D se reunió más o menos una vez por mes desde junio de 1942 hasta mayo de 1943 y luego una vez en setiembre de 1943. Estas reuniones eran comúnmente atendidas por el general Groves y el coronel Marshall después de setiembre de 1942, y muy a menudo por personalidades de las compañías industriales, que colaboraban en las plantas de producción. Las proposiciones del comité no eran imperativas, pero por lo general eran acatadas. Es así que este comité servía como cuerpo de asesoramiento del doctor Bush y del general Groves y también como órgano inicial de enlace entre las partes científica, industrial y militar del Proyecto D. M. S. El Comité Ejecutivo S-1 nunca había sido formalmente disuelto, pero quedó inactivo desde fines de 1943.

5.29. Las funciones de suministro y técnicas de la Junta de Planeamiento fueron proseguidas por la Dependencia de Manhattan en el verano de 1942 y dicha Junta quedó entonces inactiva.

5.30. Durante la primavera de 1943 se hizo evidente que la Dependencia Manhattan se hallaba en condición de proseguir los contratos del O S R D de investigación y desarrollo. Esta transferencia tuvo lugar el 1º de mayo de 1943, y marcó el fin de una conexión formal del O S R D con el proyecto del uranio.

5.31. En julio de 1943 el general Groves pidió formalmente a Conant y R. C. Tolman que fueran sus asesores científicos. Ellos ya lo estaban siendo oficiosamente y continuaron en tal carácter. En las reuniones entre el general Groves y los

directores de los varios proyectos, en particular, Compton, Lawrence, Openheimer (véase capítulo XII) y Urey fué ultimada la coordinación de los varios hombres de ciencia y de los programas técnicos.

SUCESIVA ORGANIZACIÓN: EL DEPARTAMENTO MANHATTAN

5.32. Desde 1943 no había habido cambios importantes en la organización y pocos se habían producido entre el personal activo. El general Groves había seguido cargando con la mayor responsabilidad para coordinar el esfuerzo en su conjunto y mantener su orientación hacia objetivos militares. Su deber había sido regular las varias partes del proyecto, ver que las materias primas estuvieran disponibles para las distintas instalaciones, determinar las fechas de producción, cerciorarse que el desarrollo del plan de la bomba progresara de acuerdo con éstas, tomar medidas para el empleo de las bombas llegado el momento y mantener un sistema adecuado de seguridad. Para aliviar estas cargas el general Groves contaba con la ayuda de su gran organización constituída por hombres de ciencia e ingenieros civiles y militares junto con otros colaboradores. Muchos civiles ya han sido mencionados o serán nombrados en los capítulos sucesivos, dedicados a proyectos particulares. El general de brigada T. F. Farrell actuó más tarde como representante del general Groves en las importantes fases del proyecto. El coronel K. D. Nichols, ingeniero de sección del Departamento Manhattan con sus ayudantes de Clinton Engineer Works, había sido incorporado al proyecto desde 1942. Él había sido encargado de los problemas de investigación y de producción del U-235 y del plutonio y había mostrado una comprensión excepcional de los problemas técnicos y de su importancia. Otros dos oficiales tienen que ser mencionados; ellos son los coroneles F. T. Mathias y S. L. Warren. El coronel Mathias había cargado con las principales responsabilidades en Hanford Engineer Works en forma extremadamente hábil; sus tareas habían sido las relacionadas con las fases de construcción y de operación del proyecto. El coronel Warren era el jefe de la Sección Médica del Departamento Manhattan y por lo tanto tenía la completa responsa-

bilidad en los problemas de protección de la salud en todas las partes del proyecto.

RESUMEN

5.33. Al final del año 1941 había sido completada una extensa revisión de la situación completa del uranio. Como resultado de esta revisión Bush y sus consejeros decidieron aumentar los esfuerzos en el proyecto del uranio y modificar la organización. Esta decisión fué aprobada por el presidente Roosevelt. Desde enero de 1942 hasta el comienzo del verano de 1942 el trabajo del uranio fué dirigido por Bush y Conant en colaboración con los jefes de programa y la Junta de Planeamiento. En el verano de 1942 fué asignada al ejército, a través del cuerpo de ingenieros, una parte activa en las fases técnica y de suministro, organizando el Departamento de Manhattan con este fin. En setiembre de 1942 los doctores Bush y Conant, el general Styer y el almirante Purnell fueron llevados a formar el Comité Directivo Militar para determinar las directivas generales de todo el proyecto. El mismo mes de setiembre el general Groves fué encargado de todas las actividades del ejército en el proyecto. El período del control conjunto del O S R D y del ejército continuó hasta abril de 1943 con el papel del ejército en aumento cuando el esfuerzo industrial se hacía completo. En el mes de mayo de 1943 los contratos de investigación fueron transferidos al Cuerpo de Ingenieros; el período de transición del control del O S R D al ejército acabó y el período de control completo del ejército empezó entonces.

5.34. Desde los primeros días del proyecto el presidente Roosevelt lo había seguido con interés y, hasta su muerte continuó estudiando y aprobando los amplios programas del Comité Directivo Militar. El presidente Truman, que era senador de los Estados Unidos, había estado enterado del proyecto y de su magnitud, y recibió una información completa del secretario de guerra general Groves en una conferencia de la Casa Blanca inmediatamente después de asumir el mando. Luego el presidente dió al programa su completo apoyo manteniéndose en constante contacto con sus progresos.

CAPÍTULO VI

EL PROYECTO METALÚRGICO EN CHICAGO EN 1942

INTRODUCCIÓN

6.1. Como expresamos en los capítulos IV y V, las informaciones recogidas al final del año 1942 sobre la posibilidad de producir una bomba atómica eran tales que permitían prever una expansión del trabajo y esta expansión necesitaba una reorganización administrativa. Admitíase generalmente que existía una probabilidad muy grande de llegar a fabricar una bomba atómica de fantástico poder destructivo, ya sea concentrando U-235, ya sea partiendo del nuevo elemento plutonio. Se propuso, en consecuencia, instituir un intenso programa teórico y experimental que incluía los trabajos sobre la separación de isótopos y los problemas de reacción en cadena. Se esperaba que este programa podría establecer definitivamente si se podía separar el U-235 en cantidades significativas del U-238 por métodos estadísticos o electromagnéticos; si se podría o no realizar una reacción en cadena con uranio natural o con sus compuestos y las posibilidades de producir una cantidad relativamente grande de plutonio; como igualmente si el plutonio, así aislado, habría podido o no ser separado del uranio que lo había originado. Se esperaba también que el programa proporcionara los datos experimentales y teóricos necesarios para el diseño de una bomba con reacción en cadena mediante neutrones rápidos.

6.2. Como ha sido explicado en el capítulo V, los problemas de la separación del isótopo habían sido asignados al grupo dirigido por Lawrence y Urey, mientras que los demás problemas estaban a cargo del grupo de Compton que se había organizado bajo el despistador rótulo de "Laboratorio Metalúrgico" de la Universidad de Chicago. En este capítulo y en los dos siguientes describiremos el trabajo del Laboratorio Metalúrgico y de los laboratorios asociados hasta junio de 1945. En los capítulos posteriores discutiremos el trabajo sobre la separación de isótopos y los del grupo de desarrollo de la bomba, que fué separado del Laboratorio Metalúrgico a comienzos de 1943.

6.3. Sería inútil tratar de comparar la importancia relativa de las contribuciones de los distintos laboratorios al éxito definitivo del proyecto de la bomba atómica. Este informe no hace esta tentativa y hay poca relación entre el espacio dedicado al trabajo de un grupo dado y la habilidad o la importancia de este mismo grupo. En la decisión de cuál subdivisión del proyecto de la bomba atómica debía ser discutida primero y más extensamente, nos hemos dejado guiar por criterios de interés general y de seguridad militar. Algunos desarrollos de mucha importancia técnica son de poco interés general; otros, aunque sean interesantes e importantes, deben ser mantenidos secretos. Tales criterios, aplicados a los objetivos y a las realizaciones de los varios laboratorios instalados desde que empezó el trabajo en gran escala hace que el Laboratorio metalúrgico resulte la parte del proyecto que debe tratarse más extensamente.

OBJETIVOS

6.4. De acuerdo con las directivas generales que acabamos de indicar, los objetivos iniciales del Laboratorio Metalúrgico fueron: primero, hallar un sistema que empleara uranio normal en que la reacción en cadena se realizara; segundo, mostrar que si una reacción semejante podía ocurrir era posible separar químicamente el plutonio de los demás materiales; y, por fin, obtener datos teóricos y experimentales para efectuar una

reacción explosiva en cadena con el U-235 o con el plutonio. El objetivo último del Laboratorio era preparar planes para la producción en gran escala de plutonio y para su empleo de bombas.

ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO

6.5. El Laboratorio no sólo tenía que ocuparse de los objetivos inmediatos sino simultáneamente tener presentes los últimos objetivos y trabajar por aquellos suponiendo que los objetivos inmediatos habrían sido alcanzados. No se tenía que esperar la obtención de una reacción en cadena antes de estudiar la química del plutonio. Se consideraba que el plutonio había sido separado y se debía seguir adelante con los planes para su producción y empleo. Por consiguiente, los problemas eran continuamente replanteados tan pronto como se obtenía una nueva información, y los programas de investigación eran reformados casi semana tras semana. De manera general el grupo de física experimental nuclear dirigido por E. Fermi se había fijado como objetivo fundamental hallar una reacción en cadena utilizable; la sección de química organizada por F. H. Spedding (que seguía en el orden bajo la dirección de S. K. Allison, J. Franck, W. C. Johnson y T. Hogness) se ocupaba de la química del plutonio y de los métodos de separación y el grupo teórico dirigido por Wigner era encargado del proyecto de pilas de producción. Sin embargo, los problemas estaban entrelazados y los aspectos técnicos de la fisión eran estudiados por el grupo que parecía mejor equipado para una tarea específica. Otras personalidades responsables de este grupo eran M. C. Leverett, J. A. Wheeler y C. M. Cooper, a quien sucedió luego Moore como jefe de la División Técnica. En el verano de 1942 se presentaron problemas inherentes a la salud y fué organizada la División de Sanidad bajo la dirección del doctor E. S. Stone. La difícil tarea de organizar y administrar un laboratorio de investigación que crecía en amplitud y complejidad con velocidad pasmosa fué desempeñada por R. L. Doan, director del Laboratorio.

6.6. Hemos decidido limitar este capítulo al trabajo de 1942 porque una reacción en cadena auto-sostenida fué por

primera vez realizada el 2 de diciembre de ese año mientras todo el proyecto de Chicago estaba siendo analizado por un comité de revisión con miembros especialmente elegidos por su preparación como ingenieros (*). Esta fué una dramática coincidencia y también conveniente a los fines de este informe, puesto que o el uno o el otro pueden ser considerados el punto final de un período de Laboratorio Metalúrgico. Además en previsión de una visita del comité de inspección fué preparado un informe aclaratorio. Este informe fué conocido generalmente como "Informe de factibilidad" y ha sido ampliamente utilizado durante la preparación de este capítulo.

PLAN DE ESTE CAPITULO

6.7. En este capítulo presentaremos el material en el orden antes expuesto. En la parte I discutiremos los progresos hacia los primeros objetivos, incluyendo (a) el suministro de materiales, (b) la prueba experimental de la reacción en cadena, (c) la química del plutonio y algunos problemas de la separación, (d) algunos experimentos de tipo auxiliar que se efectuaron y por último (e) el trabajo con "neutrones rápidos". Necesariamente el trabajo descrito en detalle es simplemente una muestra de la gran cantidad de trabajo experimental y teórico que se desarrolló. En la parte II describiremos las posibilidades consideradas para pilas de producción y los métodos de separación y además las propuestas específicas hechas en noviembre de 1942.

PARTE I

PROGRESOS HACIA LOS OBJETIVOS INICIALES - SUMINISTRO DE MATERIALES - GENERALIDADES

6.8. Se puso de manifiesto en los primeros capítulos de este informe que el problema consistía principalmente en conseguir material de suficiente pureza. Por lo que se refiere al

(*) Este comité se componía de W. K. Lewis, C. H. Greenwalt, T. C. Gary y Roger Williams. E. V. Murphree fué también miembro pero, debido a enfermedad, no pudo participar.

uranio, éste pareció necesitarse en forma metálica de extremada pureza, o por lo menos, como óxido de uranio muy purificado. Las demás materias que se necesitaban eran el grafito o el agua pesada o posiblemente el berilio. En aquella época era claro que aunque el agua pesada podía ser ventajosa como moderador, grandes cantidades de ésta no habrían sido aprovechables por meses y años. El berilio parecía menos ventajoso y casi igualmente difícil de conseguir. Por lo tanto, los esfuerzos para conseguir un moderador se concentraron sobre el grafito. Como ha sido explicado en el capítulo V, la consecución del uranio y del grafito no era originalmente tarea que incumbiese al Laboratorio Metalúrgico sino que estaba a cargo de E. V. Murphree y otros en la "Junta de Planeamiento". Sin embargo el interés evidente del Laboratorio Metalúrgico en el problema llevaba a la intervención continua de sus hombres más destacados. Una gran parte del crédito por el eventual éxito en conseguir materiales se debió a N. Hilberry y más tarde a R. L. Doan, siempre apoyados por A. H. Compton.

EL MINERAL URANIO

6.9. Evidentemente no hubiera habido razón de emprender este proyecto íntegro de no existir la posibilidad de encontrar bastante uranio como para fabricar bombas. Las primeras indicaciones fueron favorables, y un examen cuidadoso hecho en el mes de noviembre de 1942 mostró que se podía hacer una entrega inmediata de un adecuado tonelaje del mineral de uranio.

ÓXIDO DE URANIO Y URANIO METALICO

6.10. Al final de 1941 la única cantidad de uranio metálico existente consistía en pocos gramos de buena calidad hechos en forma experimental por la Westinghouse Electric y Manufacturing Co. y por otros, y pocas libras de polvo pirofórico muy impuro hecho por la Metal Hydrides Co. La sola cantidad considerable de mterial bruto entonces aprovechable en los Estados Unidos se hallaba bajo la forma de óxido de uranio

negro comercial que se podía obtener en cantidades limitadas de la Compañía Canadiense de Radio y Uranio. Este producto tenía de 2 a 5 % de impurezas y era este material el que había dado un factor de multiplicación de neutrones de más o menos 0.87 solamente, cuando se empleó en una pila exponencial.

6.11. En mayo de 1942, las entregas del óxido negro, muy impuro tenían un promedio de 15 toneladas por mes y empezaba a llegar una clase de mejor calidad y uniformidad. El total de impurezas era inferior al 1 %, el contenido en boro era una pequeña parte por millón, y el factor (K) de multiplicación de los neutrones era más o menos de 0.98. (Hay que recordar que el factor de multiplicación depende también de la pureza del grafito). Las entregas de este material alcanzaron en el mes de setiembre de 1942 una tonelada por día.

6.12. Experimentos hechos en el "National Bureau of Standards" por J. I. Hofmann demostraron que, empleando un método de extracción con el éter, todas las impurezas se van con una sola extracción de nitrato de uranio. El empleo de este método quita la mayor parte de las dificultades asegurando óxido puro y materiales puros para la producción del metal. En los primeros días de mayo de 1942 se completaron los arreglos con la "Mellinckrodt Chemical Works" de St. Louis para someter el nuevo grado de óxido a un proceso de extracción con éter, sobre una base de producción para una ulterior reducción del contenido en impurezas, y para entregar el producto final como dióxido pardo. Las entregas empezaron en el mes de julio de 1942 en razón de 30 toneladas por mes. Este óxido es empleado ahora como punto de arranque para la producción íntegra del metal, y no se puede esperar un mayor grado de pureza en escala comercial. En efecto, ha sido una notable hazaña la de haber desarrollado y puesto en producción en escala del orden de una tonelada por día un proceso para transformar un óxido comercial impuro en un óxido de una grado de pureza raramente alcanzada hasta en escala de laboratorio.

6.13. El proceso que la Westinghouse estaba empleando para producir el metal era la electrólisis de KUF_5 al costo de más o menos 1.000 dólares por libra. Desde que el KUF_5

era producido fotoquímicamente bajo la acción de la luz solar, este método constituyó un freno en la producción. Se encontró que el tetrafluoruro de uranio podía ser empleado en lugar del KUF_5 y se tomaron medidas para que la "Harshaw Chemical Co." de Cleveland y la fábrica "du Pont" en Penns Grove, Nueva Jersey, produjera esta sal. La producción empezó en agosto de 1942; en el mes de octubre de 1942 la "Harshaw" producía 700 toneladas por día y la du Pont 300; en ambos casos el método de preparación era el de la hidrofluoración del dióxido purificado de Mallinckrodt.

6.14. Como resultado de este suministro de material bruto a la Westinghouse, y de la ampliación de las instalaciones, las entregas de la Westinghouse habían crecido hasta un total de más de 6.000 libras en noviembre de 1942 y se podía esperar que alcanzaran el valor de 500 libras por día en el mes de enero de 1943. La pureza del metal era buena, y el costo había bajado a 22 dólares por libra.

6.15. Las entregas de metal aceptable de la "Metal Hydrides Co." fueron retardadas por varias razones y apenas comenzaron en noviembre de 1942. La producción de esta compañía estaba fijada en 1.000 libras por semana.

6.16. Ni el proceso de la Westinghouse ni el de la Metal Hydrides eran satisfactorios por completo. La intensa actividad puesta de manifiesto para acelerar la producción del metal y llevada adelante independientemente por F. H. Spedding y sus colaboradores en el Iowa State College en Ames, Iowa, y por C. J. Rodden en el National Bureau of Standards dió por resultado el desarrollo de un método satisfactorio. Se lograron facilidades de producción en Ames al final de 1942 y ya se producía más de una tonelada hacia el final del mes de noviembre. El procedimiento era muy simple, rápido y de bajo costo.

6.17. Investigaciones ulteriores sugirieron nuevos cambios que podían hacerse con ventaja, y a mediados de 1943 Spedding en Iowa y otros productores que se incorporaron al conjunto empleaban el último método de producción adoptado.

6.18. A fines de 1942 fueron hechos arreglos por la Dependencia Manhattan para aumentar la producción del metal utilizando principalmente la Mallinckrodt Chemical Works, la Union Carbide y Carbon Corporation y la Compañía du Pont.

6.19. Para concluir, casi no había metal aprovechable en la mayor parte del año 1942, lo que demoró seriamente los progresos, como veremos, pero los problemas inherentes a la producción fueron casi solucionados al final de 1942 y más o menos 6 toneladas de metal se emplearon en la pila construída en noviembre de 1942. Todo el problema de conseguir metal fué proseguido por Dependencia Manhattan al final del año, bajo la dirección general del coronel Ruhoff, quien anteriormente trabajaba con la Mallinckrodt Chemical Works. Desde el punto de vista del Proyecto Metalúrgico no hubo demoras serias o dificultades por la escasez del metal.

OBTENCIÓN DEL GRAFITO

6.20. A comienzos de 1942 la producción de grafito era satisfactoria pero, se hallaba en una condición muy distinta de la producción del metal, puesto que, la producción industrial del grafito anteriormente había sido muy grande. El problema era más bien de pureza y de prioridad. Debido a los esfuerzos de N. Hilberry, de la National Carbon Co. y de la Speer Carbon Co., ambos fueron superados. Siguiendo las sugestiones de los técnicos del National Bureau of Standards, estas compañías pudieron producir un grafito de alto grado de pureza con una absorción de neutrones más o menos 20 % inferior a la de los materiales comerciales previamente empleados. Aunque esfuerzos ulteriores para reducir las impurezas habían tenido algún éxito, el problema de la pureza fué esencialmente resuelto a mediados de 1942 y se hicieron muchos pedidos con la cooperación de la Junta de Producción de Guerra. Como en el caso del metal, el problema de la obtención del grafito fué proseguido por la Dependencia Manhattan.

REACCIÓN EN CADENA

Ulteriores experimentos intermedios

6.21. En la época en que fué organizado el Proyecto Metalúrgico, la mayoría de los físicos familiarizados con el problema creían que una pila con reacción en cadena podía probable-

mente ser construída, si era factible obtener grafito y uranio suficientemente puros. Se había trabajado bastante sobre la absorción por resonancia, sobre la teoría de la absorción y difusión de los neutrones en una pila, y sobre los experimentos intermedios para hacer posible una distribución estructural que tuviera un buen éxito en mantener una reacción en cadena. Sin embargo, había una cierta incertidumbre en los datos experimentales y en las aproximaciones que se tenían que hacer en los cálculos teóricos. Existían dos alternativas: (1) construír una pila de acuerdo con el mejor proyecto posible; (2) hacer determinaciones más cuidadosas de las constantes nucleares, para efectuar experimentos intermedios, y mejorar los cálculos. No hay duda de que la primera alternativa era la que permitía llegar más rápidamente a la producción del plutonio. Muchas eran las preguntas importantes a las cuales se podía contestar más rápidamente por una pila en función que por una serie de experimentos en pequeña escala. Desgraciadamente, la cantidad necesaria de materiales no estaba disponible y no se pudo obtener en los próximos nueve meses. Por consiguiente, fué necesario optar por la segunda alternativa, es decir, atesorar toda la información pertinente o posiblemente pertinente por todos los medios aprovechables.

6.22. La principal norma de investigación era una serie de experimentos intermedios. La instalación de cada experimento intermedio podía usarse para ensayar los cálculos obtenidos en experimentos auxiliares separados. Por ejemplo, la proporción del óxido de uranio con el grafito fué variada, se emplearon óxidos de distintos grados de pureza, el óxido fué empleado en trozos de distintas dimensiones, formas y grados de compresión, el espacio estructural fué variado, se ensayó el efecto de rodear las unidades de óxido de uranio con berilio y con parafina; y, por último, se ensayaron pilas de un mismo tipo de estructura pero de tamaño total distinto, para ver si los valores del factor de multiplicación k (para tamaño infinito) calculados según series distintas de experimentos eran idénticos. Por lo general, E. Fermi tenía a su cargo inmediato las investigaciones de los efectos de las impurezas, y S. K. Allison los ensayos sobre las dimensiones de las distintas estructuras.

Todos estos experimentos alentaban la fe del grupo en el valor de *k* calculado y en la opinión de que se podía construir una pila con *k* mayor que la unidad. En julio se dispuso de bastante óxido de uranio purificado de la Mallinckrodt para la construcción de la pila intermedia Nº 9. Como en los experimentos previos, la fuente de neutrones radio-berilio fué colocada en el punto más alto de la estructura y la densidad neutrónica medida a lo largo del eje vertical de la pila. En esa época se sabía que la densidad neutrónica disminuía exponencialmente al aumentar la distancia desde la fuente de neutrones (de ahí el nombre empleado a menudo para experimentos de este tipo, "pila exponencial") y que, para tales valores de disminución, la constante de multiplicación *k* podía ser calculada para una pila infinitamente grande de las mismas proporciones. Por primera vez la constante de multiplicación *k* así calculada de los resultados experimentales resultó más grande que uno. (El valor fué 1.007). Aun antes de este experimento Compton predijo en su informe del 1º de julio que se podía obtener un valor de *k* comprendido entre 1.04 y 1.05 en una pila que contuviera óxido de uranio muy puro y grafito, siempre que se eliminara el aire de la pila para evitar la absorción de los neutrones por el nitrógeno.

UN EXPERIMENTO AUXILIAR - NEUTRONES DEMORADOS

6.23. No haremos mención de la mayor parte de los experimentos auxiliares hechos durante este período. Sin embargo, hubo un experimento —el estudio de los neutrones lentos— que trataremos aquí porque es un buen ejemplo del tipo de experiencia que había que realizar y porque se relaciona con un efecto, no todavía mencionado, que es de gran importancia para el control de una pila a reacción en cadena.

6.24. Se sabía por investigaciones previas, algunas de las cuales se habían ya publicado, que más o menos 1 % de los neutrones emitidos en los procesos de fisión no eran despedidos inmediatamente sino que salían en una cantidad decreciente durante un período dado, hecho que recuerda la emisión de radiaciones *beta* de substancias radioactivas de vida corta.

Muchas vidas medias fueron observadas, siendo la más larga del orden del minuto.

6.25. Desde el comienzo pareció que este lapso daba a la reacción en cadena una clase de inercia que podría facilitar en mucho el control. Si el factor efectivo de multiplicación de una pila llega a ser ligeramente superior a la unidad, la densidad de los neutrones no alcanzará valores peligrosamente elevados en forma casi instantánea, sino crecerá gradualmente de manera que existe posibilidad de controlar la operación. (Otros intervalos de tiempo que intervienen, como los existentes entre choques, son demasiado cortos para poder ser útiles).

6.26. Debido a la importancia del efecto de los neutrones demorados a los fines del control, se decidió repetir y mejorar las mediciones más recientes. (El hecho de que fuera una repetición en vez de una nueva medición es una característica de la mayoría de los trabajos de física y de este período). Una descripción de la experiencia se da en el Apéndice 3. Los resultados indican que el 1 % de los neutrones emitidos por la fisión del uranio se atrasa por lo menos 0,01 segundos y que más o menos 0,7 por ciento se atrasan un minuto. Proyectando una pila tal que el valor efectivo de *k*, factor de multiplicación, sea sólo 1,01 el número de neutrones demorados es suficiente para permitir un fácil control.

LA PRIMERA PILA CON REACCIÓN EN CADENA AUTOSOSTENIDA

6.27. En las postrimerías del año 1942 había en Chicago una cantidad disponible de grafito, de óxido de uranio y de uranio metálico, suficiente para justificar una tentativa de construcción de una pila cuya reacción en cadena resultara autosostenida. Pero la cantidad del metal disponible era poca —sólo más o menos 6 toneladas— y los demás materiales no eran de ninguna manera abundantes además de ser su calidad variable. La realización fué determinada por estas condiciones más que por la óptima eficiencia.

6.28. La pila se construyó con un reticulado principal de grafito que servía de moderador y trozos de metal u óxido como unidades de reacción espaciados regularmente en el cuer-

po del grafito, constituyendo así una estructura reticulada. Instrumentos dispuestos en varios puntos en la pila o cerca de ella indicaban la intensidad de los neutrones y barras movibles de material absorbente servían de control. (Para una descripción más completa de la pila véase Apéndice 4). Como había razones para pensar que hubiese ciertos neutrones presentes debidos a fisiones espontáneas u a otras fuentes, se supuso que la reacción podía arrancar tan pronto como el mecanismo hubiese alcanzado el tamaño crítico si las barras de control no estuvieran colocadas en posición de "atraso". Por consiguiente las barras de control se colocaron en posición oportuna de "atraso" con respecto a la posición de arranque y se efectuaron con frecuencia medidas de la intensidad de los neutrones. Esto fué un acierto porque se encontró que la condición crítica ocurría en una etapa de desarrollo anterior a la que había sido anticipada.

6.29. La pila se hizo funcionar el 2 de diciembre de 1942, como un sistema autosostenido. Por lo que sabemos, era ésta la primera vez que el ser humano inició una reacción nuclear en cadena. Al principio la pila funcionó a un nivel de energía de ½ watt, pero el 12 de diciembre ese nivel había alcanzado a 200 watts.

ENERGÍA DESARROLLADA POR LA PILA

6.30. En estos experimentos no se hicieron medidas directas de la energía liberada. El número de neutrones por segundo emitidos por la pila fué estimado en términos de la actividad inducida en hojas de indium estandardizadas.

Conociendo entonces el número de neutrones producidos por la fisión se calculaba la cantidad de energía liberada (wataje).

CONCLUSIÓN

6.31. Evidentemente este experimento, efectuado el 2 de diciembre mientras un Comité revisor estaba examinando el proyecto de Chicago, contestaba sin dejar duda alguna al primer problema planteado al Laboratorio Metalúrgico: una

reacción nuclear en cadena autosostenida se había producido en un sistema que empleaba uranio normal. Este experimento había sido realizado bajo la dirección general de E. Fermi, ayudado principalmente por el grupo encabezado por W. H. Zinn y H. L. Anderson. V. C. Wilson y su grupo llevaron a cabo el desarrollo de las partes instrumentales y controles, y muchos otros en el Laboratorio contribuyeron al éxito de la empresa.

RELACIÓN ENTRE ENERGÍA Y PRODUCCIÓN DE PLUTONIO

6.32. El objeto inmediato para la construcción de una pila de uranio-grafito era probar que existían condiciones bajo las cuales se produciría una reacción en cadena, pero el fin último del Laboratorio era el de producir plutonio por una reacción en cadena. Por lo tanto, resulta interesante la relación entre la energía de funcionamiento de una pila y la proporción de plutonio producida. La relación se puede evaluar bastante fácilmente en primera aproximación. Una pila que funciona establemente tiene que producir tantos neutrones como el número que pierde. Por cada neutrón térmico absorbido en U-235 son emitidos un cierto número de neutrones. Uno de estos neutrones se requiere para mantener la cadena. Admitiendo que todos los demás neutrones, sean absorbidos por el U-235 para formar plutonio, habrá $\eta - 1$ átomos de Pu^{239} formados por cada fisión. Cada fisión libera aproximadamente 200 mev de energía. Entonces la formación de $\eta - 1$ átomos de plutonio acompaña la liberación de más o menos 200 mev. Puesto que $\eta - 1$ es un pequeño número, podemos conjeturar que para producir un kilogramo por día de plutonio, una pila con reacción en cadena tiene que liberar energía por un valor de 500.000 a 1.500.000 kilovats. La primera pila con reacción en cadena que acabamos de describir trabajaba a un máximo de 200 watts. Suponiendo que se hubiera requerido para una sola bomba de uno a 100 kg de plutonio, la pila que hemos descrito habría debido funcionar por lo menos 70.000 años para producir una sola bomba. Evidentemente, el problema de la producción de cantidades de plutonio no había sido solucionado todavía.

LA QUÍMICA DEL PLUTONIO

6.33. El segundo objetivo específico del Laboratorio Metalúrgico era demostrar que, si podía ocurrir una reacción en cadena, era factible separar químicamente el plutonio de otro material con el cual se hallase mezclado. Los progresos hacia este objetivo fueron necesariamente más lentos que la concecución de una reacción en cadena. Al principio poco se hizo en el Laboratorio Metalúrgico en lo referente a problemas químicos, aunque el problema de la extracción fué discutido en una conferencia mucho antes que el proyecto estuviera organizado y el trabajo del grupo de Seaborg en la Universidad de California sobre el plutonio fuera alentado. Los días 22 y 23 de abril de 1942 se celebró una conferencia general en Chicago sobre cuestiones de química, en la cual tomaron parte F. H. Spedding, E. W. Thiele, G. T. Seaborg, J. W. Kennedy, H. C. Urey, E. Wigner, N. Hilberry, G. E. Boyd, I. B. Johns, H. A. Wilhelm, I. Perlman, A. C. Wahl y J. A. Wheeler. Spedding, abriendo la reunión, puntualizó que dos grandes tareas incumbían a los químicos: primero, separar el plutonio en cantidades y pureza requeridas para fines bélicos; segundo, obtener una sólida noción de la química necesaria para la construcción y la conservación de la pila. El problema de la separación tenía que ser estudiado por un nuevo grupo en Chicago bajo la dirección de Seaborg, por Johns y Wilhelm en Ames, y por Wahl y Kennedy continuando el trabajo en California. Otros grupos estrechamente vinculados en Chicago eran el de Coryell, que trabaja sobre los productos de la fisión, y el de Boyd sobre problemas analíticos. El grupo de química de Chicago aumentó rápidamente desde esta época. Un nuevo edificio había sido construído para alojarlo luego, en 1942, y este edificio fué ensanchado varias veces. En su conjunto la solución de muchos problemas químicos ha sido uno de los más importantes resultados del Laboratorio Metalúrgico.

6.34. El primer isótopo del plutonio descubierto y estudiado no fué el isótopo 239 sino el isótopo 238, que es un emisor de radiaciones alfa cuya vida media es más o menos de 50 años. El U-238 bombardeado por deuterones proporciona

$_{93}Np^{238}$ que se desintegra en $_{94}Pu^{238}$ por emisión de radiaciones beta (*). La primera demostración de la existencia de estos dos nuevos elementos (prescindiendo de la original interpretación errónea de la fisión del uranio como demostración de su existencia) fué obtenida por E. MacMillan y P. H. Abelson, que aislaron el 93-238 del uranio bombardeado por deuterones en el ciclotrón de Berkeley. Este nuevo elemento fué identificado como un emisor de betas pero la muestra era demasiado pequeña para aislar el producto hermano 94-238. Más tarde, fué preparada una cantidad suficiente de Pu-238 para permitir a Seaborg, Kennedy y Wahl empezar a estudiar las propiedades químicas de aquéllos en el invierno 1940-1941 mediante el empleo de indicadores químicos de acuerdo con la técnica usual en la química de las substancias radioactivas. Mediante tales estudios muchas propiedades químicas del plutonio fueron determinadas, y se desarrollaron varios procesos químicos por medio de los cuales el Pu-239 podía ser removido de la pila con reacción en cadena. El éxito de los experimentos en la escala de indicadores condujo al plan de producir bastante Pu-239 para ser tratado como una substancia ordinaria en escala ultramicroquímica. Tales cantidades se producían por el bombardeo prolongado de varios centenares de libras de nitrato de uranio con neutrones obtenidos con ayuda de ciclotrones, primeramente en Berkeley y luego en la Universidad de Wáshington en St. Louis. A fines de 1942 algo así como 500 microgramos habían sido obtenidos bajo forma de sales de plutonio puras. Aunque esta cantidad es menor de la que se necesita para hacer la cabeza de un alfiler, para los microquímicos era suficiente para proporcionar informes considerables; porque 1 microgramo se considera suficiente para llevar adelante experimentos de peso, trituraciones, estudios de solubilidad, etc.

6.35. Por su posición en la tabla de los elementos, se podía esperar que el plutonio fuera parecido a las tierras raras o al uranio, torio, o al osmio. A cuál de estos elementos el plutonio se parece más estrechamente, depende, naturalmente, de

(*) Véase el dibujo de la pág. 8.

la disposición de los grupos de electrones exteriores y muy difícilmente hubiera podido preverse esta disposición. En su conjunto, el plutonio resulta ser más parecido al uranio que a los otros elementos mencionados y se puede considerar como el segundo miembro de una nueva serie de tierras raras que empieza con el uranio. Se descubrió bien pronto que existían por lo menos dos estados de oxidación del plutonio. (Ahora sabemos que existen 4, correspondientes a las valencias positivas de 3, 4, 5 y 6). La acertada preparación microquímica de algunas sales de plutonio y un estudio sobre sus propiedades condujo a la conclusión general de que era posible separar químicamente el plutonio de los otros materiales en la pila. Esta conclusión representa la obtención del segundo objetivo inmediato del Laboratorio Metalúrgico. Así, al final de 1942, el plutonio, desconocido por completo 18 meses antes, era considerado un elemento cuyo comportamiento químico era ya tan conocido como el de algunos elementos de la vieja tabla de Mendeléieff.

ESTUDIOS VARIOS

6.36. Entre los principales problemas que hemos mencionado, por ejemplo la reacción en cadena, la separación química, y el plan de una fábrica de producción, quedaban por solucionar innumerables problemas de menor trascendencia. Entre los más importantes figuraban la mejora de los contadores de neutrones, las cámaras de ionización y otros instrumentos, el estudio de la corrosión del uranio y del aluminio por parte del agua y otros refrigerantes posibles, la determinación de los efectos de variación de temperatura sobre las "secciones eficaces" de los neutrones, la fabricación de barras y tubos de uranio, el estudio de los productos de la fisión, y la determinación de los efectos biológicos de la radiación. Como caso típico de esta clase de trabajo podemos citar el desarrollo de los métodos de fabricación y revestimiento del metal uranio, bajo la dirección de E. Creutz. Sin la realización de estas investigaciones secundarias el proyecto no hubiera alcanzado su meta. Para dar una idea de la amplitud del trabajo, presentamos en el Apéndice 5 una lista de 20 informes

que han sido seleccionados entre los 400 que más o menos han sido publicados durante el año 1942.

LA REACCIÓN CON NEUTRONES RAPIDOS

6.37. El tercer objetivo inicial del Proyecto Metalúrgico era obtener datos teóricos y experimentales sobre una reacción mediante "neutrones rápidos", como los que se necesitarían en una bomba atómica. Este aspecto del trabajo fué al principio planeado y coordinado por G. Breit, de la Universidad de Wisconsin y más tarde continuado por J. R. Oppenheimer, de la Universidad de California. Puesto que la verdadera construcción de la bomba iba a ser la parte final del programa, la urgencia de estudiar tales reacciones no era tan grande. Por consiguiente se prestó poca atención a los problemas teóricos hasta el verano de 1942, cuando se organizó un grupo en Chicago bajo la dirección de Oppenheimer.

6.38. Al mismo tiempo un trabajo experimental, empezado sobre todo por iniciativa de G. Breit, había ido progresando (bajo la dirección general del Proyecto Metalúrgico) en los institutos que poseían un equipo adecuado para los estudios de neutrones rápidos (El Instituto Carnegie de Wáshington, el National Bureau of Standards, las universidades de Cornell, Purdue, Chicago, Minnesota, Wisconsin, California, Stanford, e Indiana y el Rice Institute). Los problemas investigados implicaban la dispersión, la absorción y la sección eficaz de fisión, el espectro de energía de los neutrones fisionados, y el atraso en la emisión de los neutrones de fisión. En su mayor parte este trabajo representaba un escalón intermedio en la tarea de confirmar y ampliar mediciones previas, pero no alcanzó ninguna nueva conclusión final. Este tipo de trabajo fué subsiguientemente concentrado en otro sitio. (Véase capítulo XII).

6.39. Como se indica en el "Informe de factibilidad" (en el capítulo escrito por J. H. Manley, J. R. Oppenheimer, R. Serber y E. Teller) el conjunto había cambiado notablemente en sólo un aspecto desde la aparición del informe de la Academia Nacional ocurrida el año anterior. Los estudios teóricos

ahora mostrabàn que la eficiencia de la bomba atómica en producir daños iba a ser superior a la indicada en el informe de la Academia Nacional. Sin embargo, el tamaño crítico resultaba todavía desconocido. Los métodos para hacer detonar la bomba habían sido en parte investigados, pero en el conjunto no pudo darse respuesta satisfactoria a determinadas cuestiones.

PARTE II

PROGRESOS HACIA EL OBJETIVO ÚLTIMO - PLAN DE UNA INSTALACIÓN DE PRODUCCIÓN - PLAN Y TRABAJO TÉCNICO

6.40. Como hemos visto, los objetivos iniciales del Laboratorio Metalúrgico habían sido alcanzados al finalizar el año 1942, pero los objetivos últimos, o sea la producción de grandes cantidades de plutonio y la fabricación de bombas y su modelo, estaban todavía lejos de ser logrados. La responsabilidad del plan y la fabricación de bombas fué transferida a otro grupo más o menos en esta época; su trabajo es expuesto en el capítulo XII. La producción del Pu-239 en cantidad había quedado como la más importante misión del Laboratorio Metalúrgico aunque compartida con la Compañía du Pont desde fines de 1942.

6.41. Teniendo en cuenta los fenómenos conocidos habría sido necesaria una producción de plutonio al ritmo de aproximadamente 1 kg por mes a un kg por día. Al ritmo de 1 kg por por día se habría necesitado una instalación de una energía comprendida entre 500.000 y 1.500.000 kw. (Se podía esperar que la máxima capacidad de la energía hidroeléctrica de las instalaciones en Grand Coulee Dam fuera de 2.000.000 de kw). Evidentemente la creación de una fábrica de producción de plutonio del tamaño requerido iba a significar la hazaña más grande, aun sin tentar la utilización de la energía térmica liberada. Sin embargo, en noviembre de 1942, la mayoría de los problemas habían sido bien definidos y se habían propuesto tentativas de soluciones. Aunque estos problemas serán discu-

tidos en cierto detalle en el próximo capítulo, los mencionaremos aquí.

6.42. Debido a que en cada pila que produce una cantidad apreciable de plutonio se engendra una cantidad considerable de calor, el primer problema del proyecto consiste en un sistema de enfriamiento. Antes que tamaño sistema pueda ser proyectado es necesario hallar la máxima temperatura a la cual una pila puede funcionar sin peligro y los factores —nuclear y estructural— que determinan esta temperatura. Otro problema importante es el método de cargar y descargar el uranio, problema complicado por el sistema de blindaje y de enfriamiento. El blindaje contra las radiaciones tenía que ser proyectado para la pila misma y para la instalación de separación química. La naturaleza de la instalación para la separación depende del proceso de separación que se emplee, que tenía que ser decidido. Por último la velocidad de abastecimiento y de construcción debían ser los factores principales en el proyecto de la pila y de la instalación química.

TIPOS POSIBLES DE INSTALACIÓN

6.43. Después de haber examinado los principales factores que intervienen en una instalación, por ejemplo, enfriamiento, seguridad y velocidad de construcción, el "Informe de factibilidad" sugería el número de tipos posibles de instalaciones en el siguiente orden de preferencia:

I. (a) Estructura de metal de uranio ordinario en un moderador de grafito enfriado con helio. (b) El mismo, con enfriamiento con agua. (c) El mismo, enfriado con bismuto fundido.

II. Estructura de metal de uranio ordinario con moderador de agua pesada.

III. Uranio enriquecido de isótopo 235 con un moderador constituído por grafito, agua pesada o agua ordinaria.

Los tipos II y III no eran de interés inmediato, puesto que no se disponía de uranio enriquecido ni de agua pesada. El desarrollo de estos tipos continuó sin embargo puesto que si se hubiera comprobado que el otro tipo no era realizable, ellos tendrían que ser empleados. El tipo I. (c), que emplea enfria-

miento con bismuto líquido, parecía ser muy promisorio desde el punto de vista de la utilización de la energía térmica liberada pero sin embargo presentaba problemas técnicos que no se habrían podido solucionar por mucho tiempo.

UNIDAD DE PRODUCCIÓN EXPERIMENTAL EN CLINTON

5.44. Durante este período, o sea durante el segundo semestre de 1942, mientras las instalaciones para la producción eran proyectadas, se puso de manifiesto que una instalación de tamaño medio era deseable. Una instalación semejante era necesaria por dos razones: primero, como unidad experimental; segundo como productora de pocos gramos de plutonio sumamente necesarios para fines experimentales. La pila intermediaria proyectada con una instalación de enfriamiento por aire de 1.000 kw de capacidad construída en Clinton, Tennessee, podía servir para ambos fines si se hubiera reservado el enfriamiento por helio para la instalación principal. Aunque los planos para la instalación principal fueron transformados para emplear un enfriamiento mediante agua, la unidad experimental siguió con enfriamiento por aire debido a la convicción de que el segundo objetivo se podía alcanzar más rápidamente. Así ésta dejó de ser una unidad experimental excepto en lo que se refiere a la separación química. La instalación principal fué construída sin las ventajas de una unidad experimental verdadera, exactamente como si los generadores hidroeléctricos del Grand Coolee hubieran sido planeados por la experiencia adquirida con un generador de tipo enteramente distinto y de una pequeña fracción de poder.

PROPÓSITOS ESPECÍFICOS

6.45. Como constaba en el "Informe de factibilidad" del 26 de noviembre de 1942, revisado por Hilberry, los proyectos para una pila de grafito con enfriamiento por helio parecían promisorios en lo que se refería a la producción inmediata; la pila que empleaba agua pesada como moderador y agua pesada o agua ordinaria como refrigerante parecía mejor para un eventual empleo en gran escala. Cierto número de pro-

puestas específicas fueron hechas para la construcción de tales instalaciones y para el estudio ulterior de los problemas implícitos. Estas propuestas estaban basadas sobre cálculos de tiempo y de costo que necesariamente eran poco más que groseras suposiciones. Como resultado de una investigación ulterior, el programa de construcción —descrito en los capítulos sucesivos— fué totalmente distinto del propuesto.

RESUMEN

6.46. El problema del abastecimiento que había detenido en parte los progresos había sido esencialmente resuelto al finalizar el año 1942. En noviembre de 1942 se construyó una pequeña pila de grafito y uranio autosostenida, y fué puesta en marcha por primera vez el 2 de diciembre de 1942 con un nivel de energía de ½ watt y más tarde de 200 watts. Ésta era fácilmente controlable gracias al fenómeno de la emisión de neutrones demorados. Un total de 500 microgramos de plutonio se fabricaron con el ciclotrón y se separaron químicamente del uranio y de los productos de la fisión. Se sabía bastante de la química del plutonio como para indicar la posibilidad de una separación en escala relativamente grande. No se hizo un gran adelanto en la teoría de la bomba, pero fueron verificados los cálculos y extendidos los experimentos con neutrones rápidos. De cualquier manera las perspectivas de la bomba parecían más favorables que el año anterior.

6.47. Fueron hechos suficientes experimentos y planes como para que se delinearan los problemas que se encontrarían en la construcción y funcionamiento de una instalación de producción en gran escala. Se hicieron ciertos progresos en la elección del tipo de instalación, siendo escogida entonces una pila de uranio metálico y grafito enfriada ya sea con helio, ya sea con agua. Fué esbozado un programa específico para la construcción de unidades experimentales de producción. Este programa contenía cálculos de tiempo y de costo.

Capítulo VII

EL PROBLEMA DE LA PRODUCCIÓN DEL PLUTONIO TAL COMO SE PRESENTABA EN FEBRERO DE 1943

INTRODUCCIÓN

NECESIDAD DE DECISIONES

7.1. El primero de enero de 1943 el Laboratorio Metalúrgico había logrado su primer objetivo, una pila que reaccionaba en cadena, y se hallaba en buen camino hacia el segundo, un proceso para la extracción del plutonio producido en tal pila. Con toda evidencia había llegado el momento de formular planes mejor definidos para una planta de producción. Las decisiones eran tomadas por el Comité Directivo (véase capítulo V) de acuerdo con sugestiones del director del Laboratorio (A. H. Compton), del Comité Ejecutivo de la S-1 y del Comité revisor que había visitado Chicago en diciembre de 1942. Las únicas decisiones que ya habían sido tomadas eran que se desarmara la primera pila de reacción en cadena y luego se la reconstruyera en un lugar a corta distancia de Chicago y que se construyera una instalación de plutonio de 1.000 kw en Clinton, Tennessee.

LA ESCALA DE PRODUCCIÓN

7.2. La primera decisión adoptada se refirió a la escala de producción que tenía que ser alcanzada. Por razones de segu-

ridad la cifra fijada no puede ser revelada aquí. Era muy grande.

LA MAGNITUD DEL PROBLEMA

7.3. Como hemos visto, la obtención de un gramo de plutonio por día corresponde a una producción de energía equivalente a 500 hasta 1.500 kw. Por lo tanto una instalación para la producción en gran escala de plutonio liberaría una cantidad muy grande de energía. En consecuencia el problema consistía en proyectar una instalación de esta capacidad sobre la base de la experiencia obtenida con una pila que podía operar a un nivel de energía de 0,2 kw solamente. En lo que se refiere al trabajo de la separación del plutonio que era igualmente importante, era necesario preparar planes para una instalación de extracción y purificación que separara algunos gramos de plutonio por día de algunas toneladas de uranio, y este proyecto tenía que basarse sobre informaciones obtenidas de estudios microquímicos hechos con sólo medio milígramo de plutonio. Naturalmente había informaciones aprovechables para el proyecto de una pila en gran escala y una instalación para la separación obtenida por experimentos auxiliarios y de los estudios sobre procesos de separación en gran escala que usaban uranio como punto de partida para el plutonio, pero aun así las extrapolaciones propuestas acerca de las pilas de reacción en cadena y de los procesos de separación eran inseguras. En tiempo de paz ningún ingeniero ni hombre de ciencia en su sano juicio, habría tomado en consideración tamaña ampliación en una sola etapa, y aun en tiempo de guerra sólo la posibilidad de alcanzar resultados de una importancia extraordinaria pudo justificarlo.

ASIGNACIÓN DE RESPONSABILIDADES

7.4. Tan pronto como se decidió iniciar una producción en gran escala de plutonio, resultó evidente que era necesario un gran aumento en la organización. La Stone and Webster Engineering Corporation fué elegida como la empresa más importante en construcciones de ingeniería para el Proyecto

D S M poco después que la Dependencia Manhattan fué encargada de la construcción de la obra en junio de 1942. En octubre de 1942 se puso de manifiesto que las varias partes componentes de la obra estaban físicamente demasiado separadas y técnicamente eran demasiado complicadas para ser puestas en las manos de una sola compañía, sobre todo en vista de la rápida marcha requerida. Por lo tanto se decidió que sería ventajoso que Stone y Webster fueran relevados en aquella parte de la obra pertinente a la construcción de partes destinadas a la producción de plutonio. Así se hizo y el general Groves escogió la firma E. I. du Pont de Nemours y Co. como la más capaz de llevar adelante esta faz de la obra. Los arreglos con varias compañías industriales hechos por la Dependencia Manhattan tuvieron diversas fases. El arreglo con du Pont se discute en detalle como ejemplo.

7.5. El general Groves habló del asunto con W. S. Carpenter Jr., presidente de la du Pont, y después de muchas discusiones con él y otros empleados de la firma, la du Pont consintió en emprender el trabajo. Al aceptar se establecía que la du Pont emprendía el trabajo, sólo porque el Departamento de Guerra lo consideraba de extrema importancia, y porque el general Groves había declarado que tal opinión era sostenida personalmente por el presidente de los Estados Unidos, el secretario de Guerra, el jefe de Estado Mayor y por el propio general Groves, y porque en su opinión la du Pont era la organización más calificada para esta tarea. Al mismo tiempo se reconoció que la Compañía du Pont ya se había hecho cargo de actividades relacionadas con la guerra y en consecuencia con su organización existente podía participar en la tarea sin excesivas dificultades.

7.6. La Compañía du Pont aceptando el ofrecimiento insistió en que el trabajo fuera hecho sin beneficio y que no afectara a ellos ningún derecho de patentes. Pero exigió se le adjudicara que en vista del carácter desconocido del campo en que se le pedía se embarcaran, y dado el imprevisible azar que implicaba, el gobierno proporcionara la máxima protección contra las pérdidas ocasionadas a la du Pont.

7.7. El contrato entre el gobierno y la du Pont, estableció un honorario fijo de 1 dólar. El gobierno estaba de acuerdo

de pagar todos los gastos del trabajo con reembolso directo, o por medio de asignaciones dispuestas por el contrato, para cubrir los gastos generales y de administración de acuerdo con el procedimiento normal de la du Pont, determinado por la intervención de revisores públicos de cuentas. Según los términos del contrato, cualquier parte de estas asignaciones, no gastada, por la du Pont, debía, al terminar el trabajo, ser devuelta a los Estados Unidos. El contrato disponía también que ningún derecho de patente afectara a la Compañía.

7.8. Las responsabilidades específicas asumidas por la du Pont consistían en proyectar, planear y construir trabajos parciales en pequeña escala en el Clinton Engineer Works en Tennessee y proyectar, planear y construir y poner en marcha una instalación de producción de plutonio en gran escala en el Hanford Engineer Works en el Estado de Wáshington. Por su estrecha vinculación con la investigación fundamental, el trabajo parcial en Clinton fué efectuado bajo la dirección de la Universidad de Chicago. Un gran número de personalidades técnicas de la du Pont fueron cedidas en préstamo a Chicago y a Clinton para proporcionar a la Universidad el numeroso personal necesario, en particular hombres con experiencia industrial, y para instruir una parte de este personal para un futuro servicio en Hanford.

7.9. Considerando que se había pedido a la du Pont que con abandono de sus tareas normales de química se orientase hacia un nuevo campo, como el que implicaba la física nuclear, se convino que era necesario para ellos depender más estrechamente del Laboratorio Metalúrgico de la Universidad de Chicago para la investigación básica y para los datos de desarrollo y consejos. La Compañía du Pont tenía una considerable experiencia en ingeniería e industrial, pero necesitaba del Laboratorio Metalúrgico para los experimentos de física nuclear y de radioquímica. El Laboratorio Metalúrgico dirigió la investigación fundamental sobre problemas relacionados con el proyecto y la operación de los trabajos parciales y de las instalaciones de producción en gran escala. Sugirió las partes esenciales de la producción del plutonio y del proceso de recuperación y del equipo, contestó a muchas preguntas espe-

cíficas hechas por la du Pont, y estudió y colaboró en las decisiones y proyectos finales de esta compañía.

7.10. El fin principal del trabajo parcial en Clinton era el desarrollo de métodos para la recuperación de plutonio. El trabajo parcial tenía que incluir por cierto, una unidad para la producción de plutonio que suministrara el plutonio que tenía que ser empleado experimentalmente. En aquella época y con la información disponible, la unidad de producción de Clinton no se pudo proyectar como una primera forma de las plantas de producción de Hanford, que, por lo tanto, tuvieron que proyectarse, construirse y ser puestas en función sin la guía de la experiencia de Clinton. En efecto, aun las unidades de recuperación de Hanford tenían que estar muy adelantadas en proyecto y abastecimiento de equipo antes de que fueran aprovechables los resultados de Clinton. Sin embargo, los trabajos parciales de Clinton demostraron ser un instrumento extremadamente importante en la solución de muchos problemas completamente nuevos encontrados en Hanford. Se produjeron también pequeñas cantidades de plutonio que, con los datos del Laboratorio Metalúrgico sobre las propiedades del plutonio, permitieron que la investigación acerca del empleo de este material adelantara en muchos meses.

ELECCIÓN DEL LUGAR DE LA INSTALACIÓN

7.11. Una vez que se pusieron de acuerdo acerca de la escala de producción y se asignaron las responsabilidades, tuvo que decidirse la naturaleza de la instalación y su lugar. El establecimiento en el valle de Tennessee, conocido oficialmente como Clinton Engineering Works, había sido adquirido por el ejército para el programa íntegro, como fué recomendado en el informe al presidente. (Véase capítulo V).

7.12. Al final de 1942 algunas reconsideraciones condujeron al general Groves a la conclusión de que ese sitio no era lo bastante aislado para una instalación de producción de plutonio en gran escala. En esa época se pensaba que podían surgir condiciones bajo las cuales una gran pila llegaría a difundir material radioactivo sobre un área lo bastante grande

como para dañar los centros poblados de los alrededores. Además del requisito de aislamiento, quedaba el de un suministro de gran poder, lo que había originariamente determinado la elección del sitio en Tennessee. Con el fin de aunar estos dos requisitos fué elegido y adquirido un nuevo sitio sobre el río Columbia en la parte central del Estado de Wáshington, cerca de la línea de energía del Gran Coulee. Este lugar fué conocido como Hanford Engineer Works.

7.13. Puesto que el río Columbia es el mejor suministro de agua de río fría pura en la Unión, el lugar de Hanford se adaptaba bien, sea para la instalación refrigerada con helio originariamente proyectada, para la instalación refrigerada con agua, que se construyó entonces. Las grandes distancias que separaban las oficinas de la casa du Pont en Wilmington, Delaware, de la instalación experimental de Clinton, Tennessee, del Laboratorio Metalúrgico en Chicago, y de Hanford constituían un gran inconveniente, pero esta separación no podía evitarse. Existían también dificultades inherentes al transporte de hombres al lugar de trabajo y a proporcionarles condiciones aceptables de vida.

ELECCIÓN DEL TIPO DE INSTALACIÓN

7.14. Era realmente demasiado reciente el desarrollo para tomar una decisión cuidadosamente meditada acerca del mejor tipo de instalación de producción del plutonio. Sin embargo se debía efectuar una elección para que el proyecto pudiera ser emprendido y la construcción empezara lo más pronto posible. Se hizo entonces una elección de ensayo y luego se cambió.

7.15. En noviembre de 1942 la instalación refrigerada por helio fué la primera elección del Laboratorio Metalúrgico. Bajo la dirección de T. Moore y de M. C. Leverett, se estudiaron planes preliminares para una instalación de esa naturaleza. Los estudios accesorios del proyecto fueron tomados como base para la elección del lugar, la elección del equipo accesorio, etc. Aunque estos estudios habían sido emprendidos en parte porque se pensaba que podían ser emprendidos más rápidamente con una instalación refrigerada de helio que con una instala-

ción refrigerada por agua se hallaron muchas dificultades. Al mismo tiempo se pidió al grupo teórico dirigido por Wigner, que preparase un informe con la colaboración del personal de ingeniería, sobre una instalación refrigerada de agua de alto poder de producción. Este grupo había estado interesado en la refrigeración por agua casi desde el comienzo del proyecto y pudo reunir los resultados de sus estudios en un informe publicado el 9 de enero de 1943. Este informe contenía muchas ideas importantes que fueron aplicadas en el proyecto de la planta de producción construída en Hanford.

7.16. Cuando du Pont entró en el conjunto aceptó al principio la propuesta de una instalación de refrigeración por helio, pero después de ulteriores estudios se decidió en favor de una instalación de refrigeración por agua. Las razones para el cambio eran numerosas. Las más a menudo mencionadas eran el peligro debido a escape de gas refrigerante a alta presión que arrastraría impurezas radioactivas, la dificultad en conseguir rápidamente grandes sopladores, la gran cantidad de helio requerida, la dificultad de cargar y descargar uranio de la pila, y el relativo bajo poder por kg de metal de uranio. A estas consideraciones se agregaban los inconvenientes peculiares de una instalación de refrigeración con agua, principalmente la mayor complicación de la pila misma y los peligros de la corrosión.

7.17. Como ocurrió en muchas decisiones en el curso de este proyecto, la elección entre varios tipos de instalaciones tuvo que hacerse sobre la base de informaciones científicas incompletas. La información es todavía incompleta pero hay común acuerdo en considerar que el enfriamiento por agua fué una elección sensata.

LOS PROBLEMAS DEL PROYECTO DE INSTALACIÓN

Especificación del problema fundamental

7.18. En el capítulo II de este informe hemos tratado de definir el problema general del proyecto del uranio tal como se presentaba en el verano de 1940. Deseamos ahora dar una

definición precisa del problema de proyecto de una instalación en gran escala para la producción del plutonio. El objetivo ya había sido delimitado por decisiones tales como la escala de producción, el tipo de instalación y el lugar. Como luego resultó, el problema específico consistía en proyectar una pila refrigerada con agua con moderador de grafito (o muchas de estas pilas) con una instalación asociada para la separación química que permitiera producir una cantidad relativamente grande de plutonio por día; la instalación debía construirse en Hanford cerca del río Columbia. Huelga decir que la velocidad de construcción y la eficiencia de la operación eran las consideraciones principales.

NATURALEZA DE LA ESTRUCTURA

7.19. Las estructuras que hemos descrito hasta ahora consistían en trozos de uranio incrustados en el moderador de grafito. Dos objeciones existen para ese tipo de estructura con fines de producción: primero, es difícil extraer el uranio sin deshacer la pila; segundo, es difícil concentrar el refrigerante en los trozos de uranio que son los puntos de máxima producción de calor. Era bastante claro que ambas dificultades podían ser evitadas si se hubiera podido emplear una estructura de barras en lugar que de puntos, esto es, si el uranio hubiera podido ser concentrado a lo largo de líneas que pasaran a través del moderador en lugar de estar ubicado en puntos. Había pocas dudas de que un dispositivo de barras sería excelente desde el punto de vista mecánico y estructuralmente pero quedaba la duda seria si de construir esa estructura, ésta habría tenido un factor k de multiplicación mayor que la unidad. Esto se presentó como un problema para los físicos teóricos y para los experimentales. Los físicos teóricos tenían que calcular cuál sería el espaciado y el diámetro óptimos de las barras de uranio; los físicos experimentales tenían que realizar experimentos exponenciales sobre estructuras de esta índole para controlar los datos hallados por el grupo teórico.

CARGA Y DESCARGA

7.20. Una vez aceptada la idea de una estructura con simetría cilíndrica, resultó evidente que la pila podía ser descargada y recargada sin deshacerla puesto que el uranio tenía que poder empujarse fuera de los canales cilíndricos en el moderador de grafito y nuevo uranio ser repuesto. Se debía decidir si el uranio tenía que estar en forma de largas barras, lo que ofrecía ventaja del punto de vista físico nuclear, o en piezas cilíndricas relativamente cortas, lo que presentaba ventaja del punto de vista del manejo. En ambos casos, los materiales serían tan fuertemente radioactivos que la descarga tendría que efectuarse por un control a distancia y el uranio descargado manejarse desde detrás de un blindaje.

MATERIALES POSIBLES - CORROSIÓN

7.21. Si el agua iba a ser empleada como refrigerador, debía ser llevada hacia las regiones donde el calor se generaba a través de canales de alguna clase. Puesto que los tubos de grafito no eran prácticos, se debía emplear algún otro tipo de caño. Sin embargo, la elección del material para el caño, como la elección de todos los materiales empleados en la pila estaba limitada por consideraciones físico-nucleares. Los caños debían ser hechos de algún material cuya sección eficaz de absorción para los neutrones no fuera lo bastante grande como para llevar el valor de k debajo de la unidad. Además, debían ser hechos de un material que no se desintegrara bajo la alta densidad de neutrones y bajo la radiación gama presente en el caño. Por último, los caños tenían que satisfacer todas las exigencias de un sistema de refrigeración por tubos; no tenían que gotear, como tampoco corroerse ni torcerse.

7.22. Desde el punto de vista físico-nuclear existían 7 materiales posibles (*Pb, Bi, Be, Al, Mg, Zn, Sn*) ninguno de éstos tenía una elevada sección eficaz de absorción para los neutrones. El berilio no era aprovechable para caños, y de todos los otros metales solamente el aluminio se pensó fuera posible desde el punto de vista de la corrosión. Pero no había

modo de asegurar que el aluminio hubiera resultado satisfactorio y las dudas acerca de la corrosión del caño de aluminio subsistieron hasta que la instalación no hubo trabajado por algún tiempo.

7.23. Mientras que la elección del material para las cañerías era muy difícil, elecçiones similares —que implicaban los dos criterios físico-nuclear y resistencia a las radiaciones— se tenían que hacer para todos los demás materiales que se emplearían en la pila. Por ejemplo, los materiales eléctricos aisladores que se empleaban en los instrumentos embutidos en la pila no tenían que desintegrarse bajo la radiación. En algunos casos en donde el control o las sondas de ensayo tenían que ser insertados y removidos en la pila, se pensó en que había una alta probabilidad de que las ondas se volvieran intensamente radioactivas como resultado de su exposición en la pila y que el grado en que esto ocurriría dependería del material empleado.

7.24. Por último, no se conocía qué efecto tendrían los campos de radiación en la pila sobre el grafito y el uranio. Se comprobó más tarde que la resistencia eléctrica, la elasticidad y la conductividad del calor del grafito, cambian con la exposición a una radiación neutrónica intensa.

PROTECCIÓN DEL URANIO DE LA CORROSIÓN

7.25. El proceso más eficiente de refrigeración hubiera sido tener agua corriente en contacto directo con el uranio en el cual era producido el calor. Había indicaciones de que esto era probablemente imposible, porque el uranio hubiera reaccionado químicamente con el agua, por lo menos en grado suficiente como para incorporar una cantidad peligrosa de material radioactivo en solución, al punto de desintegrar probablemente los trozos de uranio. Por ello fué necesario hallar algún método para proteger el uranio del contacto directo con el agua. Se consideraron dos posibilidades: una era una clase de revestimiento por deposición eléctrica o inmersión; la otra era revestir los trozos de uranio en una envoltura protectora o "caja". Este "problema de envase" bastante raro, resultó uno de los más difíciles problemas encontrado en tales pilas.

ABASTECIMIENTO DE AGUA

7.26. El problema de disipar millares de kilowatt de energía no es en ningún caso un asunto baladí. Cuanta agua se hubiera necesitado dependía por cierto de la temperatura máxima a la cual se hubiera podido calentar el agua sin peligro y de la temperatura máxima que se podía esperar en la toma del río Columbia. Por cierto la exigencia de suministro de agua era comparable a la de una ciudad bastante grande. Se tenía que disponer de todo, de estaciones de bombas, de instalaciones de filtraje y de tratamiento. Además, el sistema tenía que ser muy seguro, y hubo que proveerse de controles que operaban rápidamente para poner término a la reacción en cadena en caso de faltar el suministro del agua. Si se decidía emplear el refrigerador de "una vez a través" en lugar de la recirculación, se hubiera necesitado una cuenca de retención de manera que la radioactividad producida en el agua pudiera extinguirse antes que el agua volviera al río. El volumen del agua descargada era tan grande que los problemas de la radioactividad adquirían especial importancia, y por eso se tuvo que determinar el tiempo mínimo en que el agua debía ser retenida para lograr una seguridad absoluta.

CONTROLES DE INSTRUMENTAL

7.27. El problema del control era muy similar al discutido en relación a la primera pila con reacción en cadena, excepto que todo se hallaba en escala mucho más grande y era por eso potencialmente más peligrosa. Fué necesario disponer de controles que automáticamente mantuvieran el funcionamiento de la pila a un determinado nivel de energía. Tales controles tenían que ser conectados con los instrumentos en la pila que habrían medido la densidad de los neutrones o cualquier otra propiedad que indicara el nivel de energía. Se necesitaban también controles de emergencia que obraran casi instantáneamente si el nivel de energía mostraba una subida rápida o si ocurría alguna interrupción en el suministro del agua. Era muy deseable tener algún medio para descubrir las dificultades

incipientes así como la obstrucción de un solo tubo de agua o una rotura en el revestimiento de uno de los trozos de uranio. Todos estos controles e instrumentos tenían que ser manejados detrás de espesas paredes de blindaje más abajo descritas.

BLINDAJE

7.28. Como ya hemos mencionado muchas veces, la radiación emitida por una pila que funciona a un alto nivel de energía es tan intensa que impide a cualquier miembro del personal acercarse a ella. Además, esta radiación, y en particular los neutrones, tienen una pronunciada capacidad de salir a través de los agujeros o de las grietas de los obstáculos. Por eso el conjunto de una pila de poder debía ser encerrado en paredes muy espesas de hormigún, acero, o de otros materiales absorbentes. Pero al mismo tiempo tenía que ser posible cargar y descargar la pila a través de estos blindajes y llevar el suministro de agua adentro y afuera a través de ellos. Los blindajes no solamente tenían que ser herméticos para las radiaciones sino también para el aire, puesto que el aire expuesto a la radiación en la pila se volvería radioactiva.

7.29. Los peligros de la radiación que requieren blindaje en la pila subsisten a través de una gran parte de la instalación de separación. Puesto que los productos de la fisión asociados con la producción de plutonio son fuertemente radioactivos, el uranio después de ser expulsado de la pila tiene que ser manejado por un control lejano detrás de blindaje y tiene que ser escudado durante el transporte a la instalación de separación. La instalación de separación, en todas sus etapas, incluídos los análisis, tiene que ser manejada por un control lejano detrás de los blindajes hasta el punto donde el plutonio es relativamente libre de productos radioactivos de fisión.

MANUTENCIÓN

7.30. El problema de la manutención se expresa muy sencillamente. No podía haber manutención dentro del blindaje o de la pila, una vez que la pila había entrado en función. La misma advertencia se aplica con menor extensión a la

instalación de separación, donde era probable que se hubiera podido efectuar un cierre para manutención con tal que, por cierto, los procesos de decontaminación adecuadamente controlados de lejos fueran desarrollados en forma de reducir la intensidad de radiación debajo del nivel peligroso para el personal. El problema de manutención por las partes auxiliares de la instalación era normal excepto por la extrema importancia de tener un servicio de bombas y un equipo de potencia para prevenir una repentina rotura accidental del sistema de refrigeración.

PROGRAMA DE CARGA Y DESCARGA

7.31. Evidentemente la cantidad de plutonio en una pila que funciona inalterada aumenta con el tiempo de operación. Puesto que el Pu-239 mismo sufre la fisión, su formación tiende a mantener la reacción en cadena, al mismo tiempo que la gradual desaparición del U-235 y la aparición de los productos de fisión con amplias secciones eficaces de absorción para los neutrones tienden a detener la reacción. La determinación de cuando una pila en función tiene que ser cerrada y el plutonio tiene que ser extraído implica un balance difícil de estos factores en contra del tiempo fijado, de los costos de los materiales, de la eficiencia del proceso de separación, etc. Hablando con exactitud, este problema es más bien de operación que de proyecto de la instalación, pero alguien pensó que tenía que entrar en aquél para planear el flujo de los trozos de uranio hacia la pila, y desde la pila a la instalación de separación.

TAMAÑO DE LAS UNIDADES DE INSTALACIÓN

7.32. Nos hemos referido a la capacidad de producción de la instalación solamente en términos de valor de producción total. Naturalmente, un valor dado de producción puede ser logrado en una sola pila grande, o en varias más pequeñas. La ventaja principal de las pilas más pequeñas sería la reducción del tiempo de construcción para la primera pila, la posibilidad de hacer modificaciones en las pilas ulteriores, y quizás

lo más importante, la improbabilidad de agotamiento simultáneo de todas las pilas. La desventaja de las pilas pequeñas es que éstas requieren cantidades desproporcionadamente grandes de uranio, de moderador, etc. Existe en efecto un "tamaño natural" preferido de pilas que puede ser más o menos determinado sobre bases teóricas.

NATURALEZA GENERAL DE LA INSTALACIÓN DE SEPARACIÓN

7.33. Como ya hemos señalado, los trozos que provienen de la pila son fuertemente radioactivos y por eso deben ser manejados por un control lejano en compartimentos blindados. El esquema general que tenía que ser seguido fué sugerido a fines de 1942, y en particular vinculado con los planes de la instalación de separación en Clinton. Este esquema consistía en construir un cañón que conste de una serie de compartimentos con paredes de espeso hormigón distribuídas en línea y casi completamente enterradas en el suelo. Cada compartimento contendría los tanques necesarios de disolución o precipitación o las centrífugas. Los trozos llegarían al compartimento en una extremidad del cañón; luego se disolverían y pasarían a través de las varias etapas de solución, precipitación, oxidación, o reducción, siendo bombeados de un compartimento al sucesivo hasta salir en el último compartimento plutonio libre de uranio y de productos de la fisión. Como en el caso de la pila, todo se maneja por un control lejano sobre el suelo, pero en estas operaciones era mucho más complicado que en el caso de la pila. Sin embargo, hasta que se trataba de operaciones químicas, su naturaleza general no estaba tan alejada de los campos normales de actividad de los químicos.

CONTROL ANALÍTICO

7.34. En las primeras etapas del proceso de separación, hasta el análisis de rutina de las muestras que eran necesarias para verificar la operación de los varios procesos químicos, tuvo que ser hecho por control lejano. Tales pruebas eran

facilitadas sin embargo, por el empleo de métodos radioactivos de análisis como también de análisis químicos convencionales.

DESTINO DEL DESHECHO

7.35. El material bruto (uranio) no es peligrosamente radioactivo. El producto requerido (plutonio) no emite radiación penetrante, pero la combinación de su emisión de rayos alfa y de las propiedades químicas, lo transforma en una de las substancias más peligrosas conocidas una vez introducida en el cuerpo humano. Sin embargo las materias verdaderamente molestas son los productos de fisión, es decir, la mayor parte de los fragmentos en que el uranio se parte por fisión. Los productos de fisión son muy radioactivos e incluyen unos treinta elementos. Entre ellos se halla el xenon radioactivo y el yodo radioactivo. Éstos son liberados en cantidad considerable cuando los trozos se disgregan y tienen que ser dispuestos con un particular cuidado. Se tienen que construir grandes chimeneas que permitan el escape de estos gases junto con los humos del ácido proveniente de la primera operación de disolución, y debe quedar establecido que la mezcla de los gases radioactivos con la atmósfera no pondrá en peligro los territorios cercanos. (Como en todos los otros problemas de salud las normas de tolerancia que fueron establecidas eran muy rígidas para no dejar la mínima probabilidad de peligro para la salud de la comunidad o del personal empleado).

7.36. Muchos de los productos de fisión podían ser retenidos en la solución pero eventualmente se tenía que disponer de éstos. Por cierto había que tener en cuenta una posible contaminación del río adyacente. (En efecto, las normas de seguridad establecidas y convenidas con referencia a la contaminación del río, eran tan severas que ni las personas ni los peces del río podían ser afectados).

RECUPERACIÓN DEL URANIO

7.37. Evidentemente, aun si el uranio fuera dejado en la pila hasta que todo el U-235 hubiera sufrido la fisión, se tendría todavía una gran cantidad de U-238 que no habría

sido transformado en plutonio. Ahora bien, el proceso se detiene mucho antes de alcanzar esta etapa. El uranio es un material de alto costo y el abastecimiento total disponible es seriamente limitado. Por eso la posibilidad de recuperarlo, después que el plutonio es separado, tiene que ser tomada en cuenta. Originalmente no existía un plan para la recuperación, sino solamente la intención de almacenar solución de uranio. Más tarde, se desarrollaron métodos de recuperación en gran escala.

CORROSIÓN EN LA INSTALACIÓN DE SEPARACIÓN

7.38. Un rasgo no común de los procesos químicos implícitos era que estos procesos ocurrían en presencia de una alta densidad de radiación. Por eso los recipientes empleados podían corroerse más rápidamente de lo que se hubieran corroído en circunstancias normales. Además cualquiera de tales corrosiones habría sido cosa seria por la dificultad del acceso. Durante un largo tiempo faltó información sobre estos riesgos.

EFECTO DE LA RADIACIÓN SOBRE LAS REACCIONES QUÍMICAS

7.39. Las reacciones químicas propuestas para un proceso de extracción fueron por cierto ensayadas en el laboratorio. Sin embargo, no podían ser ensayadas con una cantidad apreciable de plutonio, ni en presencia de radiación de nada parecido a la intensidad esperada. Por eso se comprendió que un proceso que podía tener éxito en el laboratorio podía no dar resultado en la instalación.

ELECCIÓN DEL PROCESO

7.40. La descripción dada más arriba de lo que ocurría en las sucesivas cámaras del cañón era muy vaga. Tenía necesariamente que ser así, puesto que hasta enero de 1943 no se había tomado una decisión acerca de cuál proceso se emplearía para la extracción y la purificación del plutonio. El problema principal con respecto a la División Química del Laboratorio Metalúrgico era la selección del mejor proceso para la instalación.

EL PROBLEMA SANITARIO

7.41. Al lado de los riesgos normales presentes durante la construcción y la operación de una gran instalación química, se esperaban también riesgos de nuevo tipo. Dos clases de riesgos de radiación se anticiparon —neutrones generados en la pila, y partículas *alfa,* partículas *beta,* y rayos *gama* emitidos por los productos de la pila. Aunque se había comprobado que los efectos generales de estas radiaciones eran análogos a los de los rayos X, muy pocos conocimientos de detalle eran aprovechables. Naturalmente las cantidades de material radioactivo que se manejaban eran mucho más grandes de las que se habían encontrado antes.

7.42. El grupo sanitario tenía que proyectar tres programas: (1) la provisión de los instrumentos y de los ensayos clínicos para detectar cualquier síntoma de exposición peligrosa del personal; (2) investigación sobre los efectos de radiación sobre las personas, instrumentos, etc.; y (3) valuaciones del blindaje y medidas de seguridad se tenían que incorporar en el proyecto y en el plan de operación de la instalación.

LAS PROPIEDADES DEL PLUTONIO

7.43. Aunque estábamos ocupados en una empresa tan importante como la de producir plutonio, sin embargo poseíamos menos de un miligramo de éste para estudiarlo, mientras teníamos sólo poca familiaridad con sus propiedades. El estudio del plutonio, por eso, quedó como el principal problema del Laboratorio Metalúrgico.

EN ADIESTRAMIENTO DE LOS OPERADORES

7.44. Evidentemente la operación de una instalación en gran escala del tipo planeado habría requerido un amplio grupo muy inteligente de operadores. Aunque du Pont tenía una base de amplia experiencia en el funcionamiento de varios tipos de instalación química esto era algo nuevo, y era evidente que el personal necesitaría de un adiestramiento especial. Tal

adiestramiento se llevó a cabo en parte en Chicago y en sus alrededores, pero principalmente en los Laboratorios de Clinton.

LA NECESIDAD DE ULTERIORES INFORMACIONES

7.45. En los párrafos precedentes de este capítulo hemos subrayado los problemas que se presentaban al grupo encargado de proyectar y construir una instalación de producción de plutonio. En el capítulo VI ha sido revisado el progreso en este campo al final de 1942. A lo largo de estos capítulos hemos consignado que una gran cantidad de informaciones suplementarias se requerían para asegurar el éxito de la instalación. Semejantes contestaciones, como había ocurrido para la mayoría de las preguntas eran tan sólo relativas. Por consiguiente, la investigación tenía que ser realizada simultáneamente con el plan y la construcción.

PROGRAMA DE INVESTIGACIONES

7.46. Para llenar la necesidad de una ulterior información fueron preparados programas de investigación para el Laboratorio Metalúrgico y el Laboratorio de Clinton. El siguiente pasaje está tomado del programa de 1943 del Proyecto Metalúrgico:

"*Estudios de la producción del producto.* Estos incluyen todos los aspectos de la investigación, estudios del desarrollo y de los trabajos parciales necesarios para el proyecto, la construcción y el funcionamiento de pilas con reacción en cadena para producir plutonio u otros materiales.

Características de la pila. Estudios teóricos y experimentales sobre la estructura del edificio a fin de predecir el comportamiento de las pilas con nivel elevado en lo que se refiere a efectos como el térmico y barométrico, caracterísiticas de los neutrones, de activadores de pila, etc.

Control de las unidades en reacción. Proyecto y ensayos experimentales de dispositivos para el control del ritmo de reacción en las pilas.

Refrigeración de las unidades en reacción. Estudios físicos del material refrigerante, problemas de ingeniería sobre la circulación, corrosión, erosión, etc.

Instrumental. Desarrollo de instrumentos y de técnicas para dirigir la pila y examinar la radiación en la superficie de la instalación.

Protección. Blindaje, efectos biológicos de la radiación en la pila y efectos clínicos de las operaciones asociadas con la pila.

Materiales. Estudio de las propiedades físicas (mecánicas y nucleares) de los materiales de construcción para el proceso empleado en la pila, construcción y operación de ella.

Investigaciones sobre la activación. Producción de cantidades experimentales de material radioactivo por medio del ciclotrón y de pilas y estudio de la activación de los materiales por medio de neutrones, protones, electrones, rayos gama, etc.

Funcionamiento de la pila. Estudio de los procesos para hacer funcionar la pila, tales como manejo de los materiales, funcionamiento de instrumentos, etc.

Proyecto del proceso. Estudio de los posibles proyectos de producción, tales como todos los que pueden llegar a perfeccionar el trabajo en otros aspectos.

Estudios sobre la recuperación del producto. Estos incluyen todos los aspectos del trabajo necesario para el desarrollo de los procesos para la extracción de plutonio y los posibles subproductos derivados del material de la pila, así como la preparación de ésta con materiales purificados. El máximo esfuerzo en el Laboratorio Metalúrgico será el estudio de un solo proceso que habrá de escogerse antes del 1º de junio de 1943 para la producción del plutonio, siguiendo el estudio de otras alternativas, ya sea en el Laboratorio Metalúrgico o en Clinton, con toda la mano de obra disponible.

Separación. Procesos para disolver el uranio, extraer el plutonio y purificarlo eliminando los productos de la fisión.

Concentración, purificación y reducción del producto. Procesos que llevan a la producción de plutonio en forma de metal puro y estudio de las propiedades del plutonio necesarias a su producción.

Deshecho. Métodos posibles y su arreglo para recuperar los productos de la fisión y el metal de los deshechos.

Instrumental. Desarrollo y ensayos de instrumentos para seguir los procesos químicos y medir la radiación a lo largo de toda la superficie.

Protección. Estudios sobre el blindaje, determinación de los efectos biológicos de polvos radioactivos, líquidos, sólidos y de otros materiales del proceso y medidas de precaución.

Materiales. Corrosión de los materiales de empleo y estabilidad ante las radiaciones, etc.

Recuperación de los materiales activados. Desarrollo de los métodos para recoger el material activado (indicadores, etc.) por el ciclotrón y en la pila.

Estudios sobre el funcionamiento. Realización del instrumental, procesos de control y material manejado durante el funcionamiento, etc.

Proyecto de proceso. Estudio de los procesos para recoger el producto como todos los que conducen a precisar otros tipos de procesos (procesos húmedos, métodos físicos).

Investigación fundamental. Estudios de la base física, química y biológica de los fenómenos que se realizan en las pilas mientras reaccionan en cadena y propiedades básicas de todos los materiales comprendidos. Aunque la parte más importante en Clinton es el nivel que tienen que alcanzar los trabajos parciales, las condiciones de Clinton necesitarán muchas investigaciones fundamentales (alta intensidad de radiación, procesos en gran escala).

Física nuclear. Propiedades fundamentales de la fisión nuclear, tales como la sección eficaz, la emisión de neutrones, las clases de fisión, etc. Otras propiedades nucleares importantes para el proceso, tales como secciones eficaces, propiedades de los moderadores, efecto de los neutrones sobre los materiales, etc.

Física general. Instrumentos básicos para la investigación (electrónicos, de ionización, ópticos, etc.), determinación de la masa atómica, estudios de los neutrones y de las radiaciones alfa, beta, gama, investigaciones con rayos X, etc.

Química de las radiaciones. Efectos de la radiación sobre los procesos químicos y reacciones químicas producidas por la radiación.

Química nuclear. Indicación de los productos de fisión, constantes de desintegración, cadenas, investigación del núcleo y de los posibles proyectos de su empleo.

Química del producto. Química de las materias iniciales y de los materiales asociados con los procesos inclusive los subproductos.

Biología general. Estudios fundamentales de los efectos de la radiación sobre la materia viviente, metabolismo de los materiales más importantes, etc.

Investigaciones clínicas. Investigaciones básicas tales como la hematología, patología, etc.

Estudios metalúrgicos. Propiedades del U, Pu, Be, etc.

Estudios de ingeniería. Fenómenos básicos sobre corrosión y estudios similares esenciales para seguir el desarrollo desde el punto de vista de la ingeniería de los procesos.''

7.47. Un examen de este programa da una idea de la amplitud de las investigaciones que eran consideradas capaces de proporcionar una información de interés. Muchos de los temas incluídos no son problemas de investigación específicos, tales que pueden resolverse por un pequeño grupo de hombres de ciencia que trabajan pocos meses, sino que constituyen campos de investigación que pueden ser estudiados con provecho durante años. Era necesario escoger los problemas específicos capaces de dar los resultados más inmediatamente útiles pero al mismo tiempo era deseable tratar de descubrir principios generales. Por ejemplo, el efecto de la radiación sobre las propiedades de los materiales (''estabilidad a la reacción'') era casi completamente desconocido. Era necesario hacer ensayos empíricos sobre materiales especiales que podían ser empleados en la pila y concebir teorías generales para interpretar los efectos observados. Todo esfuerzo era hecho para relacionar todo el trabajo con el objetivo general: el éxito de la instalación de producción.

ORGANIZACIÓN DEL PROYECTO

7.48. Ocurrieron muchos cambios en la organización y en el personal del proyecto. Durante la mayor parte del período de la construcción en Clinton y Hansford, A. H. Compton

era director del Proyecto Metalúrgico; S. K. Allison, era director del Laboratorio Metalúrgico de Chicago y M. O. Whitaker director del Laboratorio de Clinton. El grupo de Chicago estaba organizado en 4 secciones: física, química, tecnología y sanidad. Más tarde la sección de física se dividió en física general y física nuclear. R. L. Doan era director de investigación en Clinton, pero no había una situación correspondiente en Chicago. Entre otros que habían sido agregados como asistentes o colaboradores de Laboratorio o directores de proyecto o que eran directores de sección se contaban S. T. Cantril, C. M. Cooper, F. Daniels, A. J. Dempster, E. Fermi, J. Franck, N. Hilberry, T. R. Hogness, W. C. Johnson, H. D. Smyth, J. C. Stearns, R. S. Store, H. C. Vernon, W. W. Watson, y Wigner. A principios de 1943, C. H. Thomas, de la Compañía Química Montesanto, actuó como presidente del comité para la química y la metalurgia del plutonio. Este comité coordinaba las actividades del Laboratorio Metalúrgico con las de Los Álamos (véase capítulo XII) y de otras partes. Más tarde la Compañía Química Montesanto hizo algún trabajo importante sobre problemas surgidos en la colaboración con el trabajo en Los Álamos.

7.49. La responsabilidad de estos hombres consistía en cuidar que el programa de investigación descrito más arriba, fuera proseguido y que se informara de los resultados importantes a la du Pont. Su responsabilidad consistía también en contestar a los problemas surgidos en du Pont y aprobar y criticar los planes propuestos por du Pont.

COOPERACIÓN ENTRE EL LABORATORIO METALÚRGICO Y DU PONT

7.50. Puesto que du Pont era la organización para el proyecto y la construcción y el Laboratorio Metalúrgico era la organización para la investigación, resultaba evidente que una estrecha colaboración era esencial. No sólo la du Pont necesitaba contestaciones sobre problemas específicos, sino que ellos podían beneficiarse de las críticas y de las sugestiones sobre muchos puntos en que el grupo metalúrgico estaba especialmente bien informado. Igualmente, el grupo metalúrgico po-

día aprovechar del conocimiento de du Pont sobre muchas cuestiones de proyecto, construcción y funcionamiento. Para promover esta clase de colaboración la du Pont situó uno de sus físicos, J. B. Miles, en Chicago y hubo numerosos técnicos de du Pont, particularmente C. H. Greenewalt, que dedicaron mucho de su tiempo en Chicago. Miles y Greenewalt asistían regularmente a las reuniones del Consejo del Laboratorio. No existía un arreglo recíproco semejante aunque muchos miembros del Laboratorio visitaron Wilmington oficiosamente. Además, J. A. Wheeler fué trasladado de Chicago a Wilmington y se convirtió en miembro de la plana mayor de du Pont. Existía, por cierto, un intercambio de informes y cartas y muy a menudo se realizaban conferencias entre Compton y R. Williams de la du Pont. Whitaker estuvo mucho tiempo en Willmington durante el período en que la instalación de Clinton se estaba proyectando y construyendo.

RESUMEN

7.51. En enero de 1943, se había tomado la decisión de construir una instalación de plutonio de gran capacidad. Esto significaba una pila que desarrollaba millares de kilowats y una instalación de separación química para extraer el producto. La compañía du Pont tenía que proyectar, construir, y poner en marcha la instalación; el Laboratorio Metalúrgico tenía que encargarse de la investigación necesaria. Fué elegido un sitio sobre el río Columbia en Hamford Wáshington. La decisión de construir una instalación por refrigeración con helio cedió el paso en favor de una refrigeración con agua. Los problemas eran aquellos que implicaban el proyecto de estructuración, carga y descarga, de elección de los materiales particularmente los relacionados con la corrosión y la radiación, de suministro de agua, de controles e instrumentación, de los peligros para la salud, del proceso de separación química y del proyecto de la instalación de separación. Se hicieron planes para la necesaria investigación básica y técnica y para la instrucción de los operadores. Se realizaron arreglos para coordinar la acción entre la du Pont y el Laboratorio Metalúrgico.

CAPÍTULO VIII

EL PROBLEMA DEL PLUTONIO DESDE ENERO DE 1943 A JUNIO DE 1945

INTRODUCCIÓN

8.1. La necesidad de impulsar el proyecto y la construcción de la instalación de plutonio en gran escala al mismo tiempo que la investigación y el desarrollo, condujo inevitablemente a una cierta confusión e ineficacia. Se comprendió que era esencial investigar inevitablemente muchos procesos posibles. Fué necesario investigar todas las causas posibles de fracaso, aun cuando las probabilidades de ocurrir eran muy pequeñas. Ahora que la instalación de Hanford está produciendo plutonio con éxito, creemos justo decir que un gran porcentaje de los resultados de investigación obtenidos entre el final de 1942 y los postreros días de 1944 nunca serán empleados, por lo menos para los fines originales a que estaban destinados. Sin embargo si la instalación de Hanford hubiera encontrado dificultades, cada una de las ahora superfluas investigaciones hubiera podido proporcionar la información requerida, para convertir el fracaso en un éxito. Aun ahora es imposible decir que las futuras mejoras no dependerán de los resultados de las investigaciones que parecen sin importancia hoy en día.

8.2. Se supone que se requerirían 30 volúmenes para un informe completo de los resultados científicos significativos de las investigaciones dirigidas bajo el patrocinio del Proyecto

Metalúrgico. Se trabajó en cada párrafo mencionado en el programa de investigación presentado en el último capítulo. En el informe actual sería naturalmente imposible dar más que un breve resumen de todas estas investigaciones. Creemos que no sería satisfactorio y que es preferible dar una discusión general de las unidades de las reacciones en cadena y de las instalaciones de separación tal como ahora funcionan, al mismo tiempo que una exposición de sus desarrollos precedentes.

LA REACCIÓN EN CADENA EN UNA PILA

8.3. En el capítulo I y en otros anteriores, hemos dado un breve informe de los procesos de fisión, del funcionamiento de la pila, y de la separación química. Revisaremos ahora estos temas desde un punto de vista algo distinto antes de describir las mismas instalaciones de producciones de plutonio.

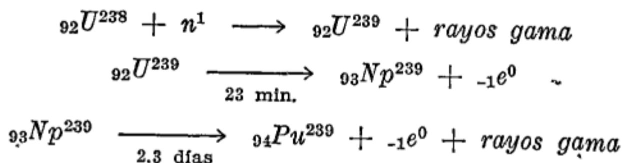
8.4. El funcionamiento de una pila depende del tránsito de los neutrones a través de la substancia y de la naturaleza de las colisiones de neutrones con el núcleo encontrado. Las colisiones de mayor importancia son las siguientes:

I. Las colisiones en que los neutrones son difractados y pierden una apreciable cantidad de energía. (a) Colisiones inelásticas de neutrones rápidos con el núcleo del uranio. (b) Colisiones elásticas de neutrones rápidos o moderadamente rápidos con el núcleo liviano de material moderador; estas colisiones sirven para reducir la energía de los neutrones a energías muy bajas (llamada térmica).

II. Colisiones en que los neutrones son absorbidos. (a) Colisiones cuyo resultado es la fisión del núcleo y que dan productos de fisión y neutrones adicionales. (b) Colisiones cuyo resultado es la formación de un nuevo núcleo que luego se desintegra radioactivamente (por ejemplo $_{92}U^{239}$ que produce $_{94}Pu^{239}$).

8.5. Solamente la segunda clase de colisiones requiere un ulterior estudio. Como se observa en las colisiones del tipo II (a), las más importantes en una pila son las colisiones entre los neutrones y el U-235, pero se produce también la fisión de la alta energía del U-238 y la fisión térmica del Pu-239. Las colisiones del tipo II (b) son principalmente las que se

producen entre neutrones y U-238. Tales colisiones ocurren para neutrones de todas las energías, pero más probablemente para neutrones cuyas energías se hallan en la región de "resonancia" situada un poco más arriba de las energías térmicas. La serie de los resultados de la colisión del tipo II (b) se representa como sigue:



$$_{92}U^{238} + n^1 \longrightarrow {}_{92}U^{239} + \textit{rayos gama}$$

$$_{92}U^{239} \xrightarrow[23\ \text{min.}]{} {}_{93}Np^{239} + {}_{-1}e^0$$

$$_{93}Np^{239} \xrightarrow[2.3\ \text{días}]{} {}_{94}Pu^{239} + {}_{-1}e^0 + \textit{rayos gama}$$

8.6. Cualquier otro proceso de absorción de no-fisión es importante principalmente porque gasta neutrones; ocurre en el moderador, en U-235, en el refrigerador, en las impurezas originariamente presente, en los productos de fisión y hasta en el plutonio mismo.

8.7. Puesto que el fin de la reacción en cadena es producir plutonio, nosotros queríamos absorber todo el excedente de neutrones en el U-238, dejando sólo los neutrones suficientes para producir la fisión y de este modo mantener la reacción en cadena. La tendencia de los neutrones de ser absorbidos por el isótopo dominante U-238 es tan grande comparada a su tendencia de producir la fisión en el U-235, 140 veces más raro, que el empeño del proyecto principal tenía que ser dirigido a favorecer la fisión (empleando un moderador, una estructura apropiada, materiales de alto grado de pureza, etc.), para mantener la reacción en cadena.

HISTORIA DE LA VIDA DE UNA GENERACIÓN DE NEUTRONES (*)

8.8. Todas las pilas con reacción en cadena proyectadas por el Laboratorio Metalúrgico o con su cooperación consisten en 4 categorías de materiales —el metal uranio, el moderador, el refrigerador, y los materiales auxiliares como los caños de agua,

(*) Véase el dibujo enfrente de la pág. 35.

el revestimiento del uranio, las tiras o las varillas de control, las impurezas, etc.—. Todas las pilas dependen para iniciar la reacción de los neutrones perdidos por fisión espontánea o por rayos cósmicos.

8.9. Supongamos que la pila tenga que ponerse en marcha por la liberación simultánea (en el metal uranio) de N neutrones de alta energía. La mayor parte de estos neutrones tenía originariamente energías arriba del umbral de la energía de fisión del U-238. Sin embargo, puesto que los neutrones pasan adelante y detrás en el metal y en el regulador, sufren numerosas colisiones inelásticas con el uranio y numerosas colisiones elásticas con el moderador, y todas estas colisiones sirven para reducir las energías por debajo de este umbral de fisión. Más particularmente, en una típica pila con moderador de grafito, un neutrón que ha escapado del uranio en el grafito viaja en media más o menos 2.5 cm entre colisiones y hace una media de más o menos 200 colisiones elásticas antes de pasar de vuelta el grafito al uranio. Puesto que en cada una de tales colisiones un neutrón pierde más o menos un sexto de su energía, un neutrón de 1 mev es reducido a la energía térmica (comúnmente tomada como de 0,025 electrón volt) bastante antes de haber completado un solo pasaje a través del grafito. Existen, por cierto, muchos neutrones que se apartan de este valor de término medio, y habrá entonces bastantes fisiones producidas por los neutrones rápidos como para acrecentar ligeramente el número de los neutrones presentes. El aumento tiene que ser valuado multiplicando el número original de neutrones N por un factor ϵ, que es llamado el efecto de fisión rápido o factor de multiplicación rápido.

8.10. Puesto que la energía media de los $N\epsilon$ neutrones presentes sigue decreciendo, la colisión inelástica en el uranio resulta insignificante, ocurriendo la reducción de energía esencialmente en el regulador. Sin embargo, la posibilidad de absorción sin fisión (captura por resonancia) en el U-238 se vuelve importante en cuanto es alcanzada la región de energía intermedia o de resonancia. Ahora bien, un gran número de neutrones en esta región de energía serán absorbidos prescindiendo de la elección del proyecto de estructura. El efecto de

tal captura puede ser expresada multiplicando $N\epsilon$ por un factor p, (que es siempre menor de uno) llamado "probabilidad de huída a la resonancia), que es la probabilidad de que un neutrón dado, poniéndose en marcha con energía superior a la región de resonancia, alcance las energías térmicas sin ser absorbido por el U-238. Así de los originales N neutrones de alta energía obtenemos $N\epsilon p$ neutrones de energía térmica.

8.11. Una vez que un neutrón ha alcanzado la energía térmica la probabilidad de que perderá más energía por colisión no es más grande que la probabilidad de que gane energía. Por consiguiente, los neutrones quedarán en esta energía media hasta que sean absorbidos. En la región de la energía térmica la probabilidad de absorción del neutrón por el moderador, el refrigerador y los materiales auxiliares es más grande que a energías más altas. De todos modos se encontró que introducíamos un pequeño error en nuestros cálculos considerando que todas estas absorciones no deseables ocurrían a esta especie de energía. Introducimos ahora un factor f, llamado factor de utilización térmica, que es definido como la probabilidad de que un neutrón térmico dado sea absorbido en el uranio. Así de los originales N neutrones rápidos hemos obtenido $N \epsilon p f$ neutrones térmicos que son absorbidos por el uranio.

8.12. Aunque existan varias maneras en que la mezcla normal de los isótopos del uranio pueda absorber neutrones, el lector recordará que hemos definido en un capítulo precedente una cantidad η, que es el número de los neutrones de fisión producidos por cada neutrón térmico absorbido en el uranio prescindiendo de los detalles del proceso. Si por eso multiplicamos el número de los neutrones térmicos absorbidos en el uranio, $N \epsilon p f$, por η, obtenemos el número de nuevos neutrones de alta velocidad producidos por los N neutrones originales de alta velocidad en el curso de sus vidas. Si $N \epsilon p f \eta$ es más grande que N, tenemos una reacción en cadena y el número de neutrones aumenta continuamente. Evidentemente el producto $\epsilon p f \eta = k_\infty$, es el factor de multiplicación ya definido en el capítulo IV.

8.13. Obsérvese que no se hizo mención de los neutrones escapados de la pila. Tal mención ha sido evitada deliberada-

mente puesto que el valor de k_∞ como ha sido definido más arriba se aplica a una estructura infinita. De los valores conocidos de k_∞ y del hecho de que estas pilas funcionan, se infiere que el porcentaje de neutrones que han escapado no puede ser muy grande. Como vimos en el capítulo II, la pérdida de neutrones se vuelve relativamente menos importante a medida que aumenta el tamaño de la pila. Si es necesario introducir en la pila una gran cantidad de material auxiliar así como un sistema refrigerante de cañería, debe construirse una pila algo más grande para contrarrestar el aumento de la absorción.

8.14. Recapitulando, una pila funciona reduciendo los neutrones de elevada energía a energías térmicas mediante el empleo de un dispositivo consistente en una estructura moderadora y permite luego que los neutrones de energía térmica sean absorbidos por el uranio, provocando la fisión que vuelve a originar neutrones de energía elevada. La reproducción de neutrones es escasamente ayudada por efecto de los neutrones rápidos; es impedida por la absorción por resonancia durante el proceso de reducción de energía, por la absorción en grafito y en otros materiales, y por escape de neutrones.

EFECTOS DE LOS PRODUCTOS DE LA REACCIÓN SOBRE EL FACTOR DE MULTIPLICACIÓN

8.15. Aun en las pilas de Hanford, que empleaban una energía muy elevada, sólo unos pocos gramos de U-238 y de U-235 eran tratados por día por millón de gramos de uranio presente. Sin embargo, los efectos de estos cambios son muy importantes. A medida que se agota el U-235, la concentración del plutonio aumenta. Por suerte, el plutonio mismo es fisionable por parte de los neutrones térmicos y tiende así a equilibrar la disminución del U-235 en lo que se refiere al mantenimiento de la reacción en cadena. Sin embargo, los otros productos de fisión son también producidos. Estos consisten típicamente en núcleos inestables y relativamente poco conocidos, así que era imposible originariamente predecir cuán grande habría sido el efecto indeseable que ellos habrían tenido sobre

la constante de multiplicación. Estos efectos dañinos son llamados corruptores.

PRODUCTOS DE REACCIÓN Y PROBLEMA DE SEPARACIÓN

8.16. Hay dos etapas principales en el proceso de producción del plutonio en Hanford: la producción en la pila y la separación del plutonio de los trozos de uranio en que se forma. Hablaremos ahora de la segunda etapa, el proceso de separación.

8.17 Los trozos de uranio que contienen plutonio contienen también otros elementos que provienen de la fisión del U-235. Cuando un núcleo de U-235 sufre la fisión, emite uno o más neutrones y se parte en dos fragmentos más o menos de igual tamaño y de masa total 235 o menos. Aparentemente la fisión ocurre raramente en masas precisamente iguales, siendo los fragmentos más abundantes un fragmento de número de masa entre 134 y 144 y un fragmento de número de masa entre 100 y 90. Así se producen dos grupos de productos de fisión: un grupo pesado con los números de masa que se extienden aproximadamente de 127 a 154, y un grupo liviano aproximadamente de 115 a 83. Estos productos de fisión son en su mayoría isótopos inestables de los treinta elementos conocidos en estos órdenes generales de número de masa. Ellos decaen típicamente por emisiones sucesivas de beta acompañadas por radiaciones gama para formar por último núcleos estables conocidos. Las vidas medias de los varios núcleos intermediarios van de fracciones de segundo a un año o más; muchas de las especies importantes poseen vidas medias del orden de un mes. Más o menos veinte diferentes elementos se hallan presentes en concentración sensible. El más abundante de éstos contiene poco menos que el 10 % de la mezcla.

8.18. Además de los productos radioactivos de fisión, el U-239 y el Np 239 (productos intermedios en la formación de plutonio) se hallan presentes en la pila y son radioactivos. La concentración de todos estos productos empieza a producirse en el momento en que la pila empieza a funcionar. Puede ocurrir que el valor del decaimiento radioactivo iguale el valor de la formación de manera que las concentraciones se vuelvan cons-

tantes. Por ejemplo, el número de átomos de U-239 producido por segundo es constante para una pila que funcione a un nivel de energía fijado. De acuerdo con las leyes de la desintegración radioactiva, el número de átomos de U-239 que desaparecen por segundo es proporcional al número de estos mismos átomos presentes y aumenta así durante los primeros pocos minutos u horas después que la pila ha sido puesta en función. Por consiguiente, pronto habrá prácticamente tantos núcleos que se desintegran por segundo como los que se forman. El equilibrio de las concentraciones para otros núcleos será alcanzado de una manera similar, siendo la concentración de equilibrio proporcional a la proporción de formación del núcleo y a su vida media. Los productos estables o vida media extremadamente larga (por ejemplo, el plutonio) aumentarán su concentración constantemente durante un tiempo considerable. Cuando la pila es detenida la radioactividad naturalmente sigue, pero en proporción absoluta que disminuye continuamente. Los isótopos de muy corta vida media pueden "desaparecer de la vista" en pocos minutos u horas; otros de vida media más larga presentan una actividad apreciable durante días o meses. Así es que en cada instante las concentraciones de los varios productos en una pila recién detenida dependen del valor del nivel de energía que poseía, de la duración del tiempo durante el cual funcionó y del lapso transcurrido desde cuando se detuvo. Por cierto, cuanto más tiempo funcionó la pila, tanto mayor es la concentración del plutonio y (desgraciadamente) tanto mayor es también la concentración de los productos de la fisión de larga vida. Hay que conciliar el deseo de un largo tiempo de funcionamiento y enfriamiento por un lado y el deseo de una fácil extracción del plutonio por otra parte.

8.19. Se pueden preparar tablas que muestren las concentraciones químicas del plutonio y de los varios productos de la fisión en función del nivel de energía, de la duración del funcionamiento y de la duración del período de enfriamiento. La vida media del U-239 es tan corta que su concentración resulta despreciable poco después que la pila se ha detenido. El neptunio se transforma bastante rápidamente en plutonio. Natu-

ralmente el peso total de los productos de la fisión, estables e inestables, queda prácticamente constante después que la pila ha sido detenida. Para las condiciones de funcionamiento de Clinton y de Hanford la máxima concentración de plutonio alcanzada es tan pequeña que constituye una dificultad esencial en la separación química.

LA ELECCIÓN DE UN PROCESO DE SEPARACIÓN QUÍMICA

8.20. El problema, por lo tanto, es de hacer una separación química de un valor diario de, digamos, varios gramos de plutonio cada varios miles de gramos de uranio contaminado con grandes cantidades de productos de la fisión peligrosamente radioactivos que comprenden veinte diferentes elementos. El problema es particularmente difícil en cuanto es necesario alcanzar en el plutonio un alto grado de pureza.

8.21. Fueron examinados cuatro tipos de métodos para la separación química, volatibilidad, absorción, extracción por solvente y precipitación. El trabajo en lo que respecta a los métodos por absorción y extracción por solvente ha sido muy amplio y tales métodos pueden ser empleados de manera creciente en el proceso principal o en la recuperación del deshecho, pero la instalación de Hanford fué proyectada para un proceso por precipitación.

8.22. (*) El fenómeno de coprecipitación, o sea, de precipitación de pequeñas concentraciones de un elemento mediante un "vehículo" de precipitación de algún otro elemento, había sido comúnmente aprovechado en química radioactiva y fué adoptado para la separación de plutonio. El primer trabajo sobre la química del plutonio limitada como estaba a pequeñas cantidades del elemento, hizo gran empleo de reacciones *con precipitación,* de las cuales se podían deducir propiedades de solubilidad. Por eso fué natural que los métodos de precipitación y separación fueran los más desarrollados en la época en que empezó el proyecto de la instalación. Se concibió que, si los procesos de separación en varias etapas tenían que

(*) Los párrafos 8.22 - 8.26 son tomados o parafraseados del informe general del Laboratorio Metalúrgico preparado en la primavera 1945

ser desarrollados en parte por aproximación empírica, se habría presentado un riesgo menor en los procesos de precipitación de gran escala que, por ejemplo, en un proceso que implicaba reacciones en la fase sólida. Además, los procesos de precipitación pueden, en un plan, ser fraccionados en una serie de operaciones repetidas (llamadas ciclos), que por consiguiente limitan el número de las partes distintas del equipo que deben ser diseñadas y permiten considerables cambios en el proceso sin cambio del equipo. Así mientras el proyecto de la instalación básica no se hizo teniendo presente un método, la elección final de un método diferente no originó trastornos.

8.23. La mayor parte de los procesos de precipitación que han recibido seria consideración hacen uso de una alternación entre los estados de oxidación (IV) y (VI) del plutonio. Tales procesos implican una precipitación de plutonio (IV) con un cierto compuesto como vehículo, luego una disolución del precipitado, oxidación del plutonio al estado (VI), y la reprecipitación del vehículo mientras el plutonio (VI) queda en solución. Los productos de la fisión que no han sido transportados por estos compuestos quedan en solución cuando el plutonio (IV) es precipitado. Los productos de la fisión transportados son removidos por el plutonio cuando se halla en el estado (VI). Ciclos de oxidación y reducciones sucesivas se efectúan hasta llegar a la decontaminación deseada. El proceso de eliminación de los productos de fisión se llama decontaminación y el grado de eliminación se prueba midiendo la alteración en radioactividad del material.

PROCESOS DE COMBINACIÓN

8.24. Es posible combinar o acoplar los varios tipos de procesos. Alguna ventaja puede obtenerse en ese modo, puesto que un tipo de proceso puede completar otro. Por ejemplo, un proceso que da buena decontaminación puede ser combinado ventajosamente con otro que, mientras es ineficaz para la decontaminación, sería muy eficiente para la separación del uranio.

8.25. Cuando se volvió necesario decidir acerca del proceso que tenía que servir como base para el proyecto de la insta-

lación de Hanford (junio de 1943), la elección, por razones explicadas más arriba, se limitó a procesos de precipitación y estuvo entre dos de esos procesos. Sin embargo, el proceso, como se decidió por último, representa una combinación de los dos.

8.26. El éxito del proceso de separación en Hanford excedió todas las expectativas. Los grandes beneficiòs y los factores de decontaminación y la relativa facilidad de la operación habían ampliamente demostrado el buen criterio que significó su elección como proceso. Esta elección estaba basada en un conocimiento de la química del plutonio, que había sido obtenido con menos de 1 miligramo de plutonio. En razón de desarrollos ulteriores puede parecer extraño el actual proceso de Hanford, pero el objeto principal, que consistía en tener un eficiente proceso para ponerlo en marcha tan pronto como las pilas de Hanford estuvieran produciendo plutonio, había sido logrado.

EL LABORATORIO DE ARGONNE

8.27. El Laboratorio de Argonne fué construído a principios de 1943 en las afueras de Chicago. Pronto se echó de ver que este sitio, originariamente propuesto para una instalación de prueba, estaba demasiado cerca de la ciudad y se empleó para la reconstrucción de la llamada pila West Stands que fué originariamente construída en los terrenos de la Universidad de Chicago y que era seguramente innocua. Bajo la dirección de E. Fermi y de sus colegas H. L. Anderson, W. H. Zinn, G. Weil, y otros, esta pila sirvió como una unidad prototipo para los estudios de la estabilidad térmica, controles, instrumentos, y blindaje, y como surgente de neutrones para los materiales de prueba y estudios físico-neutrónicos. Además resultó valiosa como escuela de adiestramiento para trabajadores de instalación. Más recientemente se construyó allí una pila con agua pesada (véase abajo).

8.28. La primera pila de Argonne, una pila de grafito-uranio, no necesita ser descrita detalladamente. Los materiales y el edificio estructural son casi idénticos a los que eran usados para la pila West Stand original. La pila es un cubo, está

rodeada de un blindaje y tiene los controles y los artefactos de seguridad parecidos a los usados más tarde en Clinton. No tenía sistema de refrigeración y funciona normalmente a un nivel de energía de sólo pocos kilowatts. Se la hizo funcionar ocasionalmente a niveles de energía elevados, pero por muy cortos períodos. Considerando que se trata más bien de una reconstrucción de la primera unidad con reacción en cadena que haya sido construída, es sorprendente que haya continuado funcionando por más de dos años sin producirse el menor inconveniente.

8.29. Uno de los empleos más valiosos de la pila de Argonne ha sido la medición de las secciones eficaces de la absorción neutrónica de una gran variedad de elementos que se hubieran podido emplear en pilas como miembros estructurales, etc., o que hubieran podido hallarse en los materiales de la pila como impurezas. Estas mediciones se hacían observando la alteración en los controles necesarios para hacer k_{eff} igual a 1.00 cuando una cantidad conocida de la substancia en examen es insertada según una posición definida en la pila. Los resultados obtenidos se expresaban en términos de "coeficientes de peligrosidad".

8.30. Una abertura en la parte superior de la pila deja salir un rayo muy uniforme de neutrones térmicos que se pueden usar para experimentos de pila exponencial, para mediciones directas de secciones eficaces de absorción, estudios de la cámara de Wilson, etc.

8.31. Un fenómeno interesante que ocurre en la parte superior de la pila es la producción de un rayo o flujo de neutrones "fríos". Si una suficiente cantidad de grafito se interpone entre la superficie superior de la pila y un punto de observación pocos metros más arriba, se encuentra que la distribución de energía neutrónica corresponde a una temperatura mucho más baja que la del grafito. Se presume que es el resultado de una transmisión preferencial por el grafito cristalino de los más lentos o "más fríos" neutrones, cuya longitud de onda mecánico-cuántica es grande comparada con la distancia entre planos sucesivos en los cristales de grafito.

8.32. Más recientemente, se construyó en el Laboratorio de

Argonne una pila que emplea como moderador agua pesada. Se encontró que el rayo de muy elevada intensidad de neutrones producido por esta pila es muy conveniente para el estudio de "óptica neutrónica", por ejemplo, la reflexión y refracción de los rayos de neutrones como en el caso del grafito.

8.33. Objetivo constante del Laboratorio de Argonne ha sido una mejor comprensión de los procesos nucleares en el uranio, neptunio y plutonio. Se hicieron repetidamente experimentos para mejorar la exactitud de las constantes así como las secciones eficaces de la fisión térmica del U-235, U-238, y Pu-239, las probabilidades de no fisión de los neutrones de absorción, para cada uno de estos núcleos, y el número de neutrones emitidos por fisión.

LA INSTALACION DE CLINTON

8.34. En el capítulo VI hemos hecho mención de proyectos para una planta experimental destinada a la producción de plutonio que tenía que ser construída en el emplazamiento de Clinton en Tennessee. En enero de 1943, los planes de este proyecto estaban muy adelantados; la construcción empezó poco después. M. D. Whitaker fué nombrado director de los laboratorios de Clinton. Los planes para la unidad de instalación experimental fueron hechos por la du Pont y el Laboratorio Metalúrgico en conjunto; la construcción fué emprendida por la du Pont, y la operación de instalación atendida por la Universidad de Chicago como parte del Proyecto Metalúrgico.

8.35. Los objetivos principales de las instalaciones de Clinton eran producir plutonio y servir como unidad de instalación experimental para separación química. Respecto a la investigación, el empeño en Clinton se concentraba en la química y en los efectos biológicos de las radiaciones. Se proporcionó un gran laboratorio para los análisis químicos, para investigación sobre los métodos de purificación, para estudios del producto de la fisión, para el desarrollo de procesos intermedios de extracción y decontaminación, etc. Más tarde fué construído un "laboratorio caliente", esto es, un laboratorio cuyo trabajo sobre material altamente radioactivo fué contro-

lado de lejos. Funcionaba también un taller de instrumentos y un laboratorio que fueron utilizados ampliamente. Existían además comodidades para trabajos de la sección de Sanidad, que fué muy activa, de índole clínica y experimental. Había un pequeño laboratorio de física en el cual se hicieron algunos trabajos importantes empleando neutrones de intensidad más elevada de los que eran disponibles en el Laboratorio de Argonne. Las instalaciones principales construídas en el Laboratorio de Clinton fueron la pila y la instalación para la separación; éstas serán descriptas brevemente más abajo.

LA PILA DE CLINTON

8.36. En cada pila que funcionaba constantemente el factor de multiplicación k debe ser mantenido igual a l cualquiera sea el nivel de energía. El mejor k_∞ que había sido observado en una estructura de uranio-grafito no podía ser prácticamente alcanzado en una pila debido a la pérdida de neutrones, al sistema de enfriamiento, a los tubos cilíndricos que contenían uranio, al revestimiento protector del uranio y otros factores secundarios. Asegurado un enfriamiento por medio del aire y una temperatura máxima de seguridad para la superficie del uranio, debía elegirse un tamaño de pila que pudiera producir mil kilowatts. El k efectivo habría bajado con el crecer de la temperatura, pero no suficientemente como para ser un factor determinante. Aunque una esfera era la forma ideal, consideraciones prácticas recomendaron un bloque rectangular.

8.37. La pila de Clinton consistía en un cubo de grafito que contenía canales horizontales rellenados con uranio. El uranio se encontraba en forma de cilindros de metal protegido por un estuche de aluminio impenetrable a los gases. Los cilindros de uranio o trozos podían ser deslizados en los canales del grafito; un espacio era dejado para permitir el paso de aire para refrigerar y permitir empujar los trozos afuera, en la parte trasera de la pila, cuando estaban listos para ser tratados. Además de los canales para los trozos había varios otros agujeros en la pila para controlar las varillas, los instrumentos, etc.

8.38. La pila de Clinton era considerablemente más grande que la primera pila de Chicago (véase capítulo VI). Más importante que el aumento de tamaño de la pila de Clinton era el sistema de refrigeración, los blindajes más pesados y los medios para cambiar las cosas. La producción que pudiera lograrse en la instalación de Clinton se cifraba en un valor que significaba que la pila tenía que operar a un nivel de energía de 1.000 kw.

8.39. El instrumental y los controles eran esencialmente idénticos a los de la primera pila. La intensidad de los neutrones en la pila se medía por medio de una cámara de ionización de BF_3 y era controlada por varillas de acero al boro que podían ser sacados de la pila haciendo por consiguiente variar la fracción de neutrones disponibles para producir la fisión.

8.40. A pesar de un despliegue importante de instrumentos y de dispositivos de seguridad, la característica que más impresiona de la pila es la sencillez de la operación. La mayor parte del tiempo los operadores no tenían nada que hacer a excepción de anotar las lecturas de los varios instrumentos.

LA INSTALACIÓN DE SEPARACIÓN

8.41. Aquí, como en Hanford los procesos para el plutonio tenían que ser efectuados mediante controles desde lejos y detrás de espesos blindajes. El equipo de separación estaba instalado en una serie de celdas cercanas hechas con paredes de pesado hormigón. Estas celdas formaban una estructura contigua (cañón) que tenía más o menos 100 pies de largo y enterradas sus dos terceras partes en el suelo. Al lado de este cañón estaba la pieza de control, los laboratorios analíticos y un laboratorio para la primera purificación del plutonio después de haberlo decontaminado hasta un punto de relativa seguridad.

8.42. Los trozos de uranio expuestos en la pila eran trasladados bajo agua a la primera de estas celdas y luego disueltos. Se efectuaban las operaciones posteriores bombardeando las soluciones desde un tanque o centrífuga a otro.

CONSTRUCCION DE LA PILA DE CLINTON

8.43. La pila de Clinton empezó a funcionar el 4 de noviembre de 1943 y después de pocos días llegó a un nivel de energía de 500 kw y a una temperatura máxima en la superficie de un trozo de uranio de 110°C. Mejoras en la circulación de aire y una elevación del máximo de temperatura de la superficie del uranio a 150°C. llevaron el nivel de la energía a 800 kw, nivel a que fué mantenido hasta la primavera de 1944. A partir de este momento se efectuó un cambio en la distribución del uranio, teniendo este cambio por objeto distribuir la energía en la pila disminuyendo la cantidad de metal cerca del centro con respecto a la de más afuera y aumentar así el nivel de energía media sin alcanzar en ningún lugar una temperatura demasiado elevada. Al mismo tiempo se realizaron mejoras en las soldaduras de las protecciones de los trozos, haciendo posible el funcionamiento de la pila a temperatura más elevada. Como resultado de ello, en mayo de 1944 fué alcanzado un nivel de energía de 1800 kw; éste fué nuevamente aumentado después de la instalación de mejores ventiladores en junio de 1944.

8.44. De este modo la realización de la pila de junio de 1944 superó en mucho toda expectativa. Dada la facilidad de control, la seguridad de la operación y la ausencia de radiaciones peligrosas, la pila resultó más que satisfactoria. Había realmente pocas fallas, que se podían atribuir a errores en el proyecto o en la construcción.

8.45. La pila misma era simple ya sea en el concepto, o en la práctica. No ocurría lo mismo en la instalación para la separación del plutonio. El paso desde la primera pila con reacción en cadena a la pila de Clinton era razonablemente previsible; un paso mayor y más inseguro, en cambio, era necesario en el caso del proceso de separación porque la instalación para la separación en Clinton había sido proyectada sobre la base de experiencias donde habían sido empleados sólo microgramos de plutonio.

8.46. A pesar de todo el proceso de separación, fué una halagüeña realidad La primera partida de trozos provenien-

te de la pila entró en la instalación de separación el 20 de diciembre de 1943. A fines de enero de 1944 la instalación de separación recibía metal proveniente de la pila en cantidades de $^{1}/_{3}$ de ton. por día. El 1º de febrero de 1944 fueron entregados 190 miligramos de plutonio y el 1º de marzo de 1944 varios gramos. Además, el rendimiento de la operación, que al comienzo era de más o menos 50 %, en junio de 1944 osciló entre el 80 y 90 %.

8.47. Durante todo este período un grupo numeroso de químicos trabajaron en Clinton para mejorar el proceso y desarrollarlo para Hanford. El problema de Hanford difería del de Clinton en cuanto se deseaban concentraciones más elevadas de plutonio. Además, aunque merecían felicitaciones los químicos por el éxito de la instalación de Clinton, el proceso era complicado y caro. Toda mejora en el aumento de producción o en la descontaminación o en la simplificación general tenía que ser muy bien pensada.

8.48. Además de probar la pila, la instalación de separación y la producción de varios gramos de plutonio para uso experimental en Chicago, Clinton y en otra parte, los Laboratorios de Clinton habían sido una inapreciable escuela y un centro de control para Hanford en lo que se refiere a experimentos médicos, estudios de la pila, estudios de purificación y estudios químicos y físicos del plutonio y de los productos de la fisión.

8.49. Como ejemplo típico de la clase de problemas abordados aquí y en Chicago damos a continuación los siguientes, consignados en un solo informe, de mayo de 1944:

Problemas dados por terminados durante mayo de 1944: Búsqueda de un nuevo agente oxidante, Efecto de la radiación sobre el agua y soluciones acuosas, Solubilidad del peróxido de plutonio, Compuestos de plutonio adecuados para el envío, Distribución del producto de la fisión en la instalación que emplea el proceso por solución, Proyecto preliminar del proceso de extracción por absorción, Colaboración en los trabajos parciales de absorción, Terminación del proyecto de proceso por absorción.

Nuevos problemas presentados durante mayo de 1944: Método de análisis del nuevo producto, Efecto de la radiación

sobrè el grafito, Mejora en la producción, Sondajes én la nueva pila, Recuperación del uranio de desecho.

LA INSTALACION DE HANFORD

8.50. Sobrepasa el objeto de este informe dar a conocer algún dato de la construcción de las obras de ingeniería de Hanford, pero hay que esperar que la historia completa de esta extraordinaria empresa y de su compañera, las obras de ingeniería dę Clinton, será publicada alguna vez en el futuro. El lugar de Hanford fué examinado por representantes del General Groves y de du Pont al final de 1942, y la aprobación del lugar efectuada por el nombrado general después de haberlo inspeccionado personalmente. Se hallaba del lado este del río Columbia, en el centro de Wáshington, al norte de Pasco. En los primeros meses de 1943, 320 kilómetros cuadrados de tierra fueron adquiridos por el gobierno de esta región (por compra o arriendo) por medio de la división de bienes inmuebles de la oficina del jefe de ingenieros. Para toda eventualidad, un área de casi 1.600 kilómetros cuadrados fué puesta bajo la fiscalización del gobierno. En el momento de la adquisición del terreno había unas pocas granjas y dos pequeños poblados, Hanford y Richland, en el lugar que fué antes una planicie de salvias y colinas áridas. El 6 de abril de 1943 se empezó a remover el suelo para la construcción del campo de Hanford. En el momento de máxima actividad, en 1944, este campo era una ciudad de 60.000 habitantes, la cuarta ciudad en magnitud del Estado. Ahora, sin embargo, el campo está prácticamente abandonado porque el personal que trabajó se aloja en Richland.

8.51. El trabajo se inició con las pilas de producción en Hanford el 7 de junio de 1943 y el funcionamiento de la primera pila empezó en setiembre de 1944. El lugar fué estudiado para cinco pilas, pero se empezó la construcción de sólo tres. Además de las pilas había instalaciones para la separación de plutonio, los puestos de bombeo y las instalaciones de agüa. Existía además una pila de reacción en cadena de baja energía para controlar el material. No solamente las pilas

mismas estaban muy separadas una de otra, por seguridad —de muchos kilómetros—, sino que las instalaciones para la separación estaban muy alejadas de las pilas y una de otra. Las tres pilas funcionaban en el verano de 1945.

ENVASE Y CORROSIÓN

8.52. Nadie que haya vivido este período de proyecto y construcción de la instalación de Hanford puede olvidar el problema del "envase", esto es, el problema de encerrar los trozos de uranio en una protección de metal. Durante visitas periódicas el autor pudo apreciar inmediatamente el estado del problema del envase por la atmósfera de depresión o de satisfacción que existía en el laboratorio. No era por cierto un problema fácil el de encontrar una capa que protegiera el uranio de la corrosión del agua, que mantuviera los productos de la fisión fuera del líquido elemento, que no absorbiera demasiados neutrones y que transmitiera el calor del uranio al agua. Además, la falla en un solo punto podía provocar la inutilización de una pila entera en función.

8.53. Las tentativas de encontrar características tan especiales implicaban trabajo experimental sobre procesos de metalización electrolítica, procesos por inmersión en caliente, procesos de revestimiento por cementación, aleaciones de uranio resistentes a la corrosión y recubrimiento mecánico o procesos de envase. Las protecciones mecánicas o envases de aluminio delgado eran realizables del punto de vista de la física nuclear, y por lo tanto se los eligió como la solución más apropiada del problema. Pero el problema de encontrar una conexión uniforme de conductor de calor entre uranio y el aluminio que lo rodea y el problema de fabricar un recipiente cerrado impermeable a los gases era muy engorroso. El desarrollo alternativo de métodos tuvo que ser proseguido hasta el último momento y pocas semanas antes de cargar los trozos de uranio en la pila, no había seguridad de que algún método en desarrollo sería satisfactorio. Una pequeña modificación final, aunque aparentemente importante en el proceso de envase que había sido elegido, se adoptó en octubre de 1944, después que la

primera pila empezó un funcionamiento experimental. En el verano de 1945 no habían sido encontradas fallas en el envase.

ESTADO ACTUAL DE LAS INSTALACIONES DE HANFORD

8.54. En las postrimerías de 1944 y en los primeros meses de 1945 fueron terminadas la segunda y tercera pila de Hanford y puestas en marcha, así como las instalaciones para la separación química. Hubo, por cierto, alguna dificultad; sin embargo, ninguno de los temores expresados, tales como fallas de los envases, formación de película en los tubos de agua o efectos de las radiaciones sobre los procesos químicos, resultaron justificados. Desde más o menos el principio del verano de 1945 las pilas están funcionando al nivel de energía proyectado, produciendo plutonio y calentando el río Columbia (*). Las instalaciones de química están separando plutonio del uranio y de los productos de la fisión con una eficacia superior a la que había sido prevista. El producto terminado está siendo entregado. Cómo se lo puede emplear es cuestión que será tratada en el capítulo XII.

EL TRABAJO SOBRE AGUA PESADA

8.55. En los capítulos precedentes se habló de las ventajas del agua pesada como moderador. Es ésta más eficiente en "frenar" los neutrones que el grafito y presenta una menor absorción que éste. Es, pues, posible construir una unidad de reacción en cadena con uranio y agua pesada y con ésta lograr un coeficiente *k* de multiplicación considerablemente más elevado y un tamaño más pequeño que con el grafito. Pero es necesario tener agua pesada.

8.56. En la primavera de 1943 el Laboratorio Metalúrgico decidió intensificar los experimentos y cálculos en lo referente a una pila con agua pesada. Con este fin se formó un comité dirigido por E. Wigner, un grupo dirigido por H. C. Vernon fué trasladado de la Columbia a Chicago y D. H. Smyth, que

(*) El aumento real de la temperatura es tan pequeño que no produce efectos sobre la vida de los peces. Para mayor seguridad este resultado fué confirmado por una serie de experimentos muy completos.

acababa de ser nombrado director del laboratorio, fué solicitado para tomar la dirección general.

8.57. La primera tarea de este grupo fué la de estudiar en qué manera se podía emplear mejor el agua pesada para asegurar el éxito total del Proyecto Metalúrgico tomando en cuenta el limitado nivel de producción de agua pesada que ya había sido autorizado.

8.58. Resultó evidente que el nivel de producción era tan bajo que se habrían necesitado dos años para producir suficiente agua pesada para "moderar" una pila de tamaño considerable para la producción de plutonio. Por otra parte, podía haber suficiente agua pesada para moderar una pequeña pila de "laboratorio", que podía proporcionar datos útiles. De cualquier manera, durante el verano de 1943 las incertidumbres eran tantas, ya sobre la duración de la guerra, ya sobre el éxito de las demás partes del proyecto D.S.M., que parecía conveniente un estudio completo de las posibilidades de las pilas con agua pesada. Podía aumentarse la producción de agua pesada o bien construirse una pila experimental más pequeña. Durante el verano de 1943 se desarrolló un profundo estudio del problema, pero en noviembre se decidió acortar el programa y la construcción fué limitada a una pila de 250 kw colocada en el laboratorio de Argonne.

LA PILA DE AGUA PESADA DE ARGONNE

8.59. Tal vez lo que más impresiona del aspecto de la pila de uranio y agua pesada de Argonne es su pequeño tamaño. Aun con el blindaje de hormigón que la rodea parece relativamente pequeña comparada con las pilas de uranio-grafito.

8.60. El 15 de mayo de 1944 la pila de uranio-agua pesada de Argonne estaba lista para hacer el control. Colocados los trozos de uranio se halló que la reacción en cadena se volvía autosostenida en la pila agregando sólo 3/5 de agua pesada. La capacidad de reacción de la pila era tan superior a las expectativas que ésta hubiera resultado muy superior a la capacidad de control si se le hubiera agregado el residuo de agua pesada. Para hacer frente a esta situación nueva y favorable

fué sacada una parte del uranio y fueron agregados nuevos órganos de control.

8.61. Con estas modificaciones fué posible llenar el tanque al nivel prefijado. El 4 de julio de 1944 W. H. Zinn informó que la pila estaba en marcha satisfactoriamente a 190 kw y el 8 de agosto de 1944 comunicó que estaba trabajando a 300 kw.

8.62. En general las características de esta pila diferían poco de aquellas de pilas análogas de grafito. Esta pila necesita varias horas para alcanzar el equilibrio. Muestra pequeñas (menor que el 1%) pero repentinas fluctuaciones de nivel de energía, probablemente debidas a burbujas en el agua. No puede ser detenida tan completa y rápidamente como la pila de grafito debido a la tendencia de los rayos gamas atrasados en producir nuevos neutrones (del agua pesada). Como anticipamos, la densidad de neutrones es elevada en el centro. Los blindajes, los controles, los disipadores de calor etcétera funcionaron satisfactoriamente.

LA SECCIÓN DE SANIDAD

8.63. El más importante objetivo del grupo sanitario, era en cierto sentido negativo, o sea asegurar que nadie sufriera daños serios como consecuencia de los particulares peligros de la empresa. Las historias médicas de personas que habían sufrido serios daños o habían muerto a consecuencia de radiaciones eran estudiadas con todo cuidado. El éxito de la sección de Sanidad en abordar estos problemas fué notable. Aun en el grupo de investigación donde el control es el más difícil fueron extremadamente pocos los casos de efectos dañinos, ni siquiera temporarios. Los sistemas de seguridad aplicados en el proyecto de la instalación y durante las operaciones eran tan eficaces que los peligros de la casa y del automóvil de familia eran muy superiores para el personal de cualquiera de las instalaciones.

8.64. Para alcanzar este objetivo, el grupo de sanidad trabajó en tres direcciones principales:

1) Adopción del examen médico antes del empleo y revisión frecuente durante el empleo, particularmente de aquellas personas expuestas a las radiaciones.

2) Establecimiento de unidades de tolerancia para ciertas dosis de radiaciones y perfeccionamiento de instrumentos para medir los riesgos del personal; advertencias sobre protección metálicas, etcétera; mediciones continuas de intensidades de radiaciones en los distintos lugares de la instalación; mediciones de la contaminación de los trajes, mesas del laboratorio, desagüe, atmósfera, etcétera.

3) Realizar investigaciones sobre los efectos de la exposición directa de personas y animales a las distintas clases de radiación y sobre los efectos de la introducción en el estómago y en los pulmones de varios materiales radioactivos o tóxicos tales como los productos de la fisión plutonio y uranio.

ANÁLISIS DE SANGRE

8.65. El recuento de los glóbulos blancos en la sangre fué empleado como criterio principal para establecer si una persona había sufrido las consecuencias de una excesiva exposición a las radiaciones. Cierto número de estados anormales por insuficiencia de glóbulos fueron observados y relacionados con el grado de superexposición. Individuos afectados apreciablemente fueron dedicados a otros trabajos o recibieron breves vacaciones; nadie mostró efectos de enfermedad permanente.

8.66. Al mismo tiempo se reconoció que el recuento de los glóbulos blancos en la sangre no es un criterio del todo decisivo. Ciertos trabajos sobre animales mostraron que un daño serio puede ocurrir antes que el análisis leucocitario dé alguna indicación de peligro. En consecuencia se hicieron ensayos más minuciosos de la sangre sobre individuos seleccionados y animales experimentales con la esperanza de hallar un síntoma que advirtiera el daño antes de que éste se hubiera producido.

INSTRUMENTOS PARA MEDIR LAS RADIACIONES

8.67. La sección de Sanidad tenía la principal responsabilidad en la construcción de medidores de bolsillo que indicasen la extensión de exposición de las personas. El primero

de estos instrumentos fué un simple electroscopio de forma y tamaño de una estilográfica. Tales instrumentos eran cargados electrostáticamente cada mañana y leídos al finalizar el día. La proporción en que se habían descargado indicaba la cantidad total de radiación ionizante a que habían quedado expuestos. Desgraciadamente, estos instrumentos no eran fieles siendo el error de lectura casi siempre en el sentido positivo, esto es en el sentido de la exposición exagerada. Al comienzo se estableció la práctica de dotar de dos de estos medidores de bolsillo a todo aquel que entraba en un área peligrosa. Se registraba la lectura en el momento del ingreso y a la salida. Los medidores eran continua y gradualmente mejorados. La sección de Sanidad más tarde introdujo "contramarcas de film", pequeños trozos de película con una contramarca de identificación; las películas eran periódicamente reveladas y examinados los ennegrecimientos producidos por la radiación. Estos instrumentos individuales, tales como medidores de bolsillo y películas con contramarcas constituyeron precauciones complementarias y probablemente innecesarias. Instalaciones permanentes de blindaje garantizaban completamente la seguridad. Sus efectos eran frecuentemente controlados ya con instrumentos fijos o móviles.

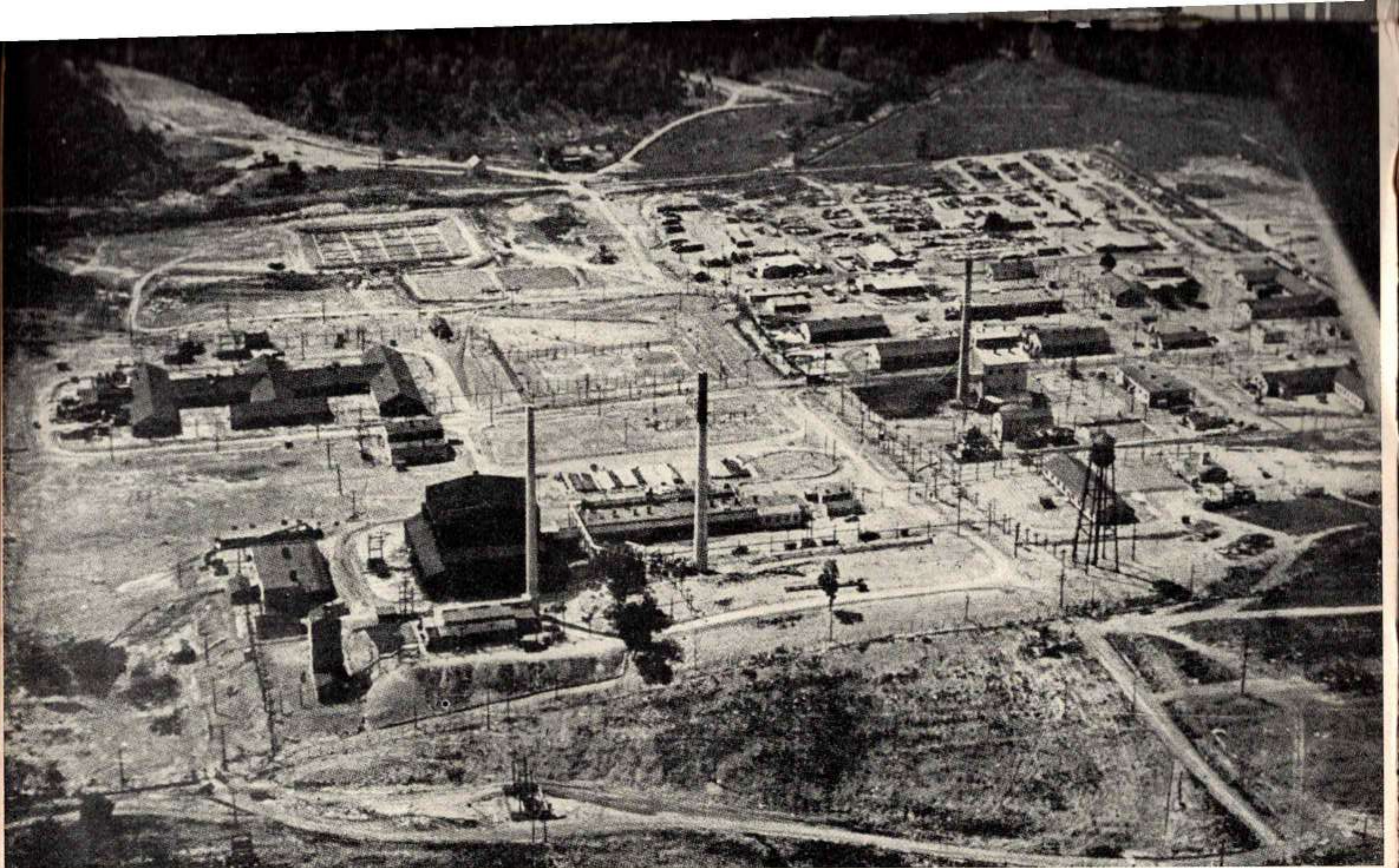
8.68. La sección de Sanidad colaboraba con la división de Física en el desarrollo y empleo de varios otros instrumentos. Estaba el "Estornudo" para medir la concentración de polvo radioactivo en el aire y el "Pluto" para medir la contaminación de emisores de partículas alfa (comúnmente plutonio) de las mesas del laboratorio y de los equipos. Se empleaban contadores para verificar la contaminación de los trajes de laboratorio antes y después que los trajes se lavaran. En las puertas de salida de ciertos laboratorios estaban escondidos contadores y tocaban alarma cuando alguien pasaba con traje, piel o cabellos contaminados. Además se hacían inspecciones periódicas en las zonas de los laboratorios.

8.69. Uno de los estudios hechos se vinculaba con la meteorología. Se volvió esencial conocer si los gases despedidos por los depósitos (en Clinton y en Hanford) emitían productos radioactivos de fisión en concentraciones peligrosas. Como el comportamiento de estos gases depende mucho de la húme-

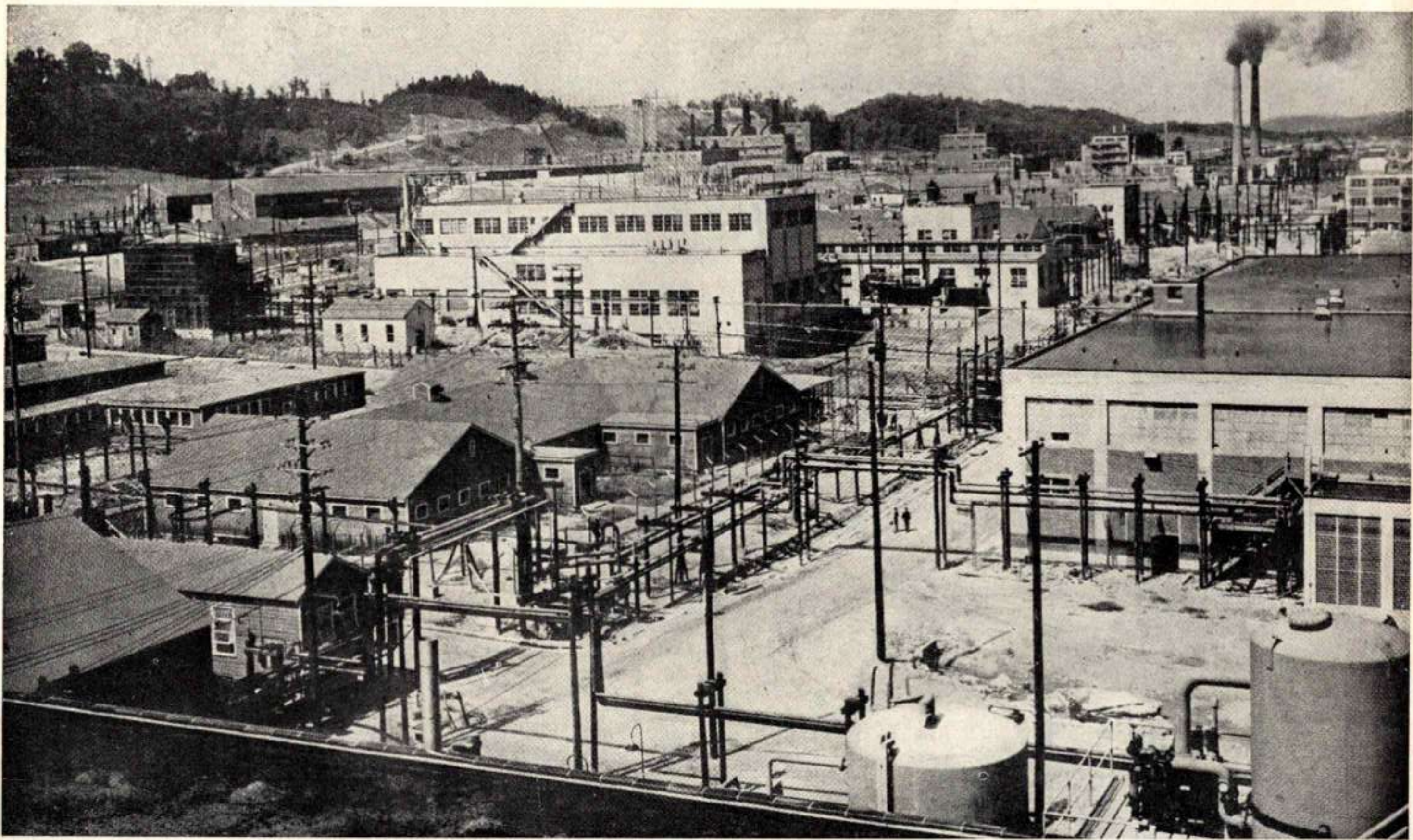
riba: Edificios de la administración del Departamento Técnico de Manhattan en Oak
ige, Tenn. *Abajo:* Hanford, cerca de Pasco, Washington, que en cierta época alojó
lares de trabajadores que construyeron las plantas en la obra técnica de Hanford.
Actualmente una ciudad muerta



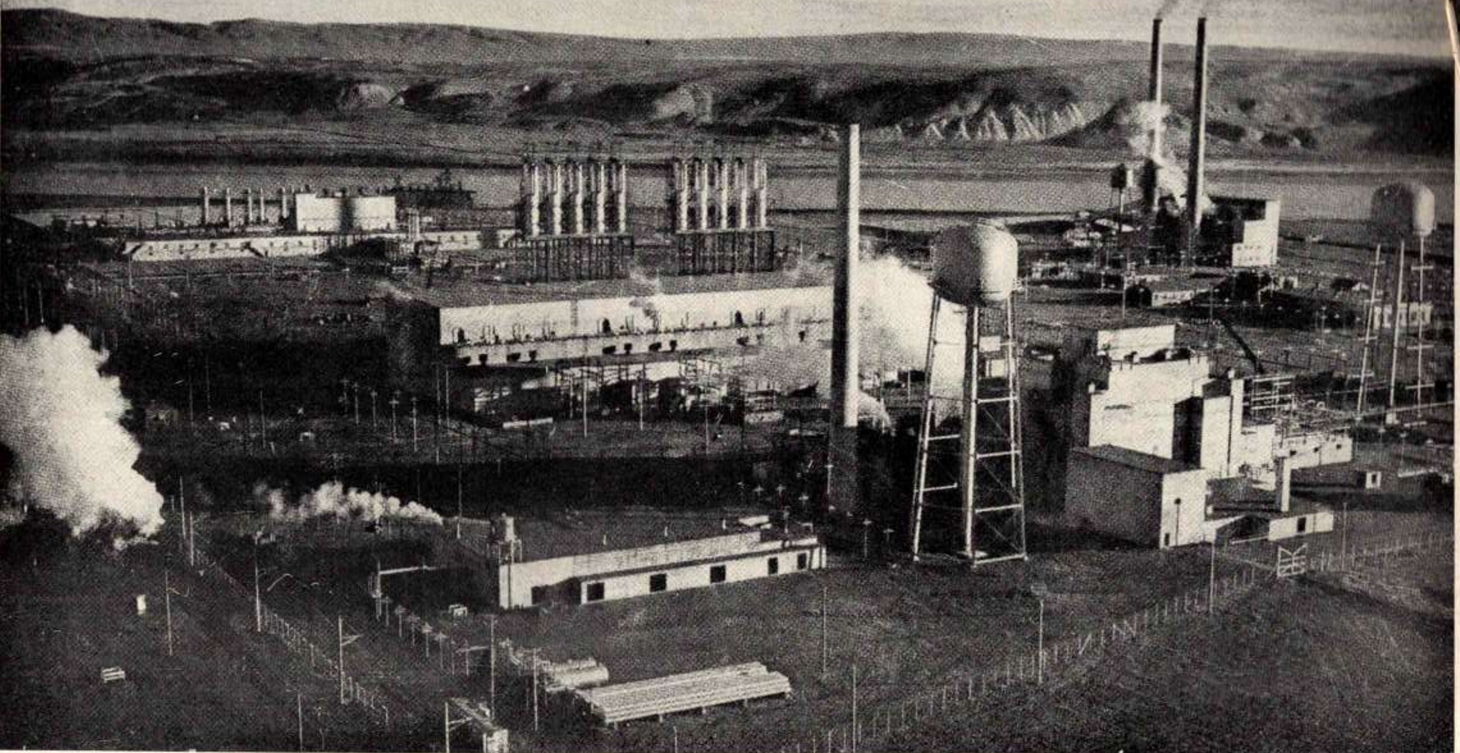
Diagrama del lugar de la Obra Técnica de Hanford, cerca de Pasco, Washington



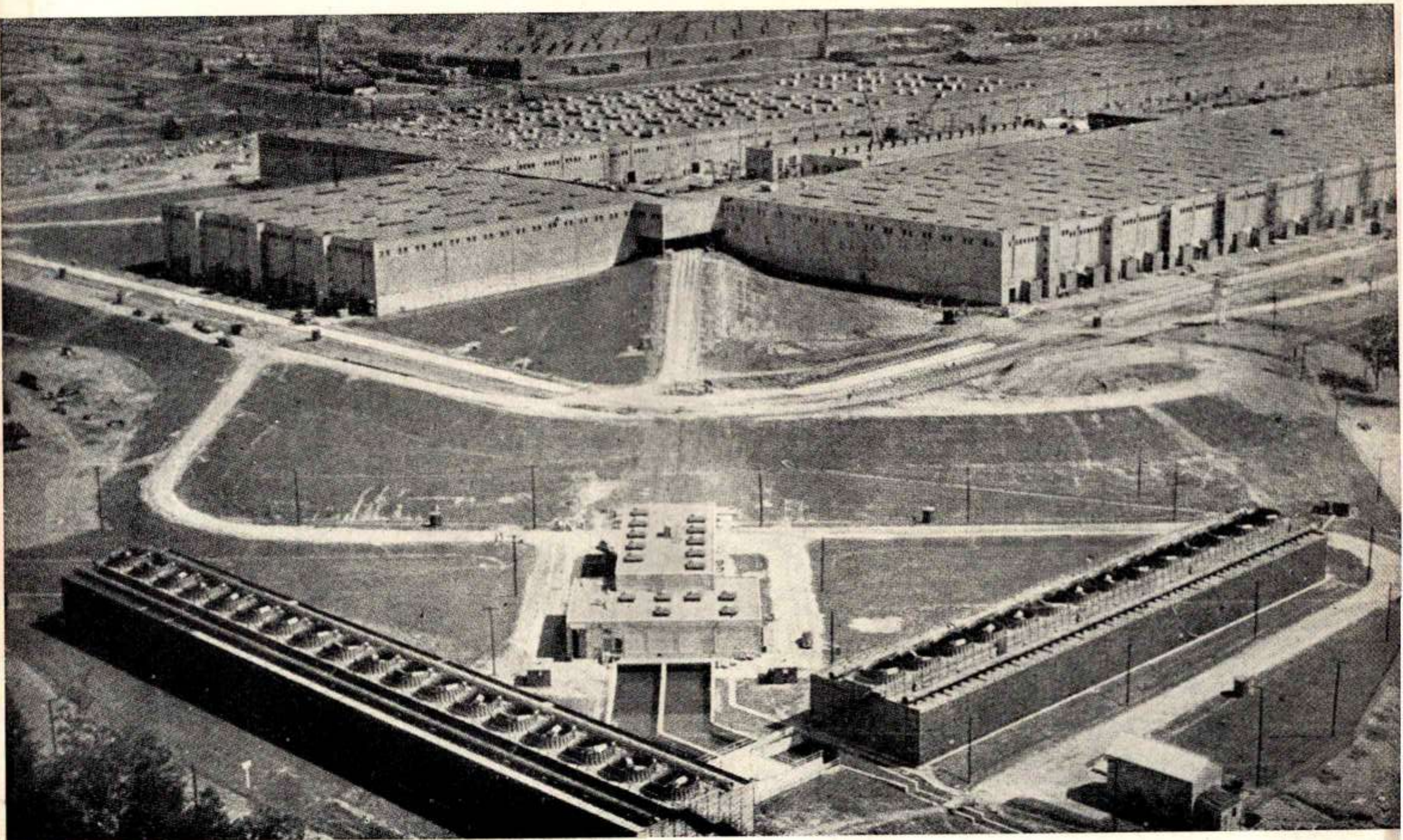
Una instalación experimental en la Obra Técnica de Clinton, en Oak Ridge, Tenn.



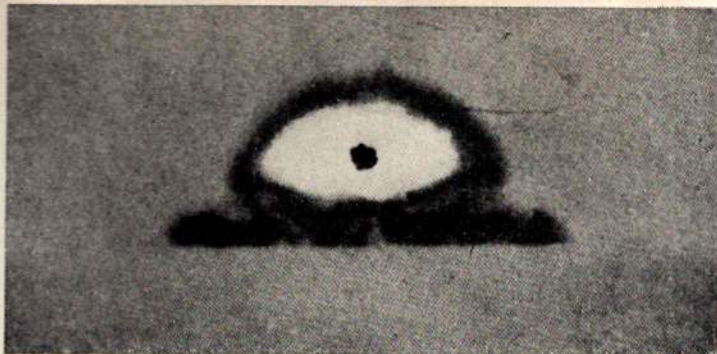
Una de las zonas de producción en la Obra Técnica de Clinton, en Oak Ridge, Tenn.

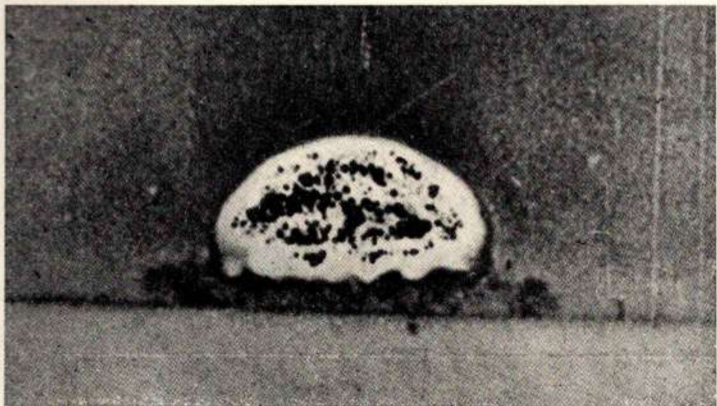


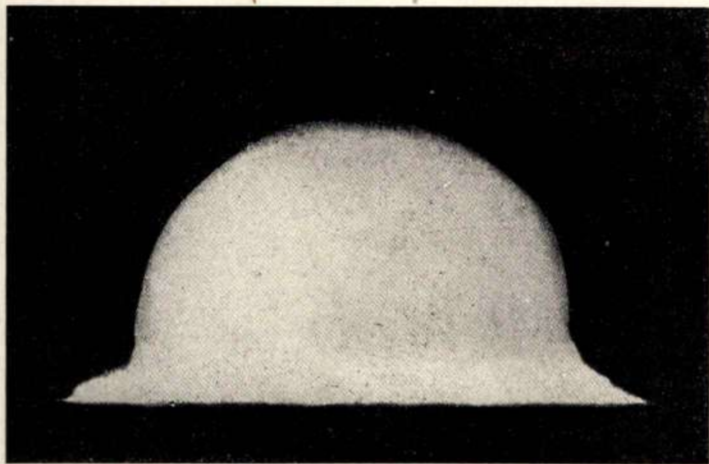
Una de las zonas de producción en la Obra Técnica de Hanford, cerca de Pasco, Washington



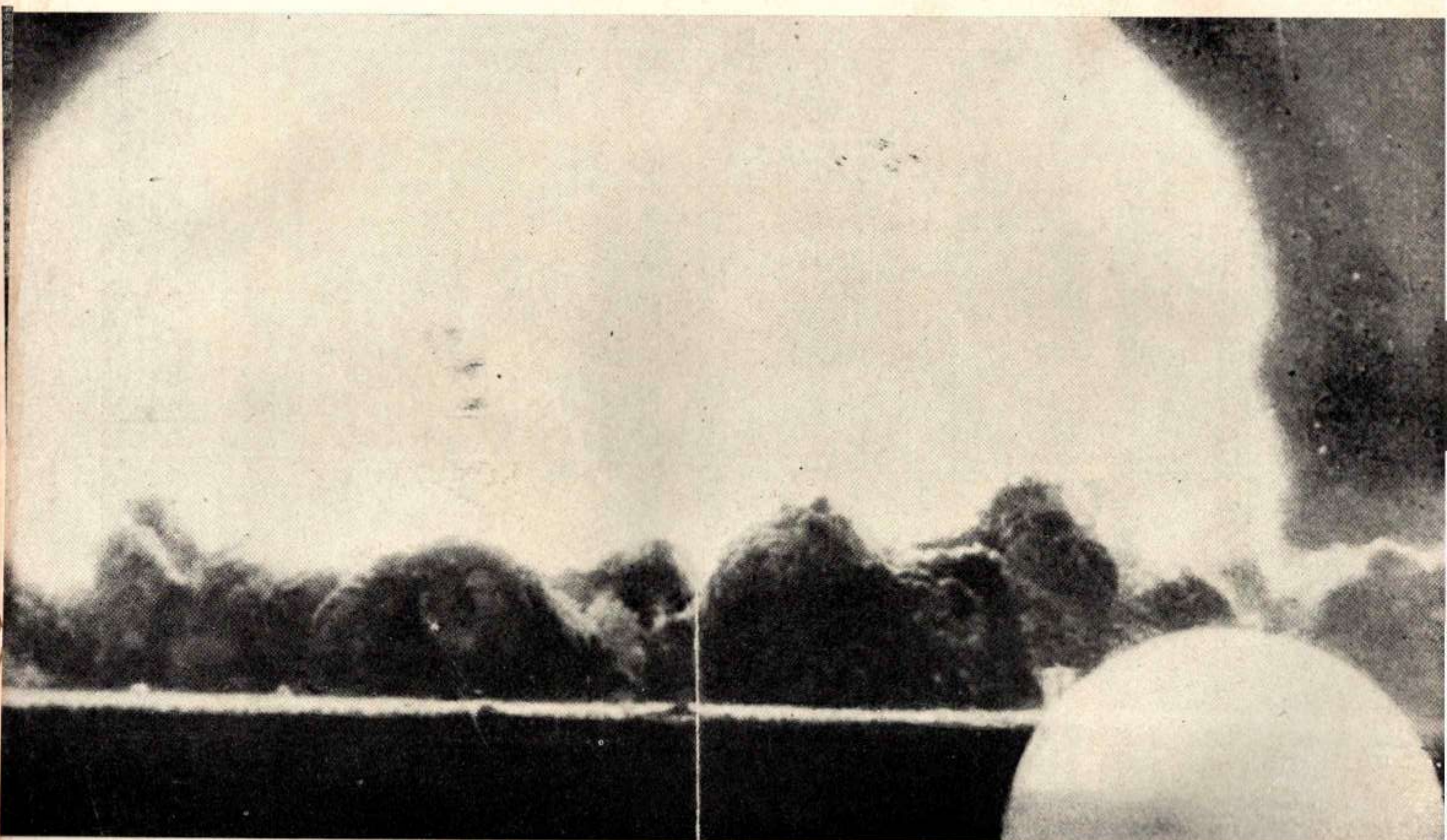
Una de las plantas de producción de la Obra Técnica de Clinton, en Oak Ridge, Tenn.







Primer experimento de la bomba atómica en Nueva México del 16 de julio, desde una distancia de 9 kilómetros. *Arriba:* El comienzo de la explosión. Esta pequeña nube luego alcanzó una altura de 40.000 pies. *En el centro:* Nube multicolor proveniente de la explosión. Según los observadores, la zona negra era más brillante que el sol mismo. *Abajo:* Una etapa sucesiva de desarrollo de la nube



Fotografía tomada en el momento en que la bomba estalló desde una distancia de 9 kilómetros. El disco de abajo a la derecha es una reflección accidental en la lente del aparato.

dad se realizaron estudios en ambos lugares durante un período de muchos meses y fueron especificadas condiciones satisfactorias para los depósitos.

INVESTIGACIÓN

8.70. Debido a que en esta empresa la cantidad y la variedad de los peligros provenientes de las radiaciones eran sin precedentes, fueron tomadas todas las precauciones razonables; sin embargo, no había a mano medios seguros para determinar la eficacia de las precauciones. Era, pues, esencial profundizar previamente los conocimientos en la forma más completa posible. Con este fin se llevó a la práctica un extenso programa con animales experimentales en tres direcciones principales: 1) Exposición a los neutrones y a las radiaciones *alfa, beta y gama;* 2) ingestión de uranio, plutonio y productos de fisión; 3) inhalación de uranio, plutonio y productos de fisión. Bajo la dirección general del doctor Stone estos experimentos fueron realizados en Chicago, Clinton y en la Universidad de California principalmente por los doctores Cole y Hamilton. Se obtuvieron resultados interesantes y amplios.

RESUMEN

8.71. La falta de lugar y las limitaciones de seguridad impiden un informe detallado sobre el trabajo de los laboratorios e instalaciones acerca de la producción de plutonio..

8.72. Dos tipos de absorción de neutrones son fundamentales para la operación de la instalación: el primero, la absorción de neutrones en el U-235 resultante de la fisión, mantiene la reacción en cadena como puente de neutrones; el otro, absorción de neutrones en el U-238 lleva a la formación del plutonio, que es el producto deseado.

8.73. El curso de una reacción nuclear en cadena en una pila heterogénea regulada con grafito puede describirse siguiendo una sola generación de neutrones. Los neutrones rápidos originales son ligeramente aumentados en número por fisión rápida, reducidos por absorción por resonancia en el

U-238 y luego reducidos por absorción a las energías térmicas en el grafito y en otros materiales mermados y por escape; los neutrones que quedan, que han sido transformados en lentos en el grafito, producen la fisión en el U-235, originando una nueva generación de neutrones rápidos parecida a la generación previa.

8.74. El producto, plutonio, debe ser separado mediante procesos químicos de una cantidad del mismo orden de productos de fisión y de una cantidad mucho mayor de uranio. De los varios procesos posibles de separación el elegido consiste en una serie de reacciones que incluyen la precipitación con portadores, la disolución, oxidación y reducción.

8.75. La reacción en cadena fué estudiada a niveles bajos de energía en el laboratorio de Argonne a comienzos de 1943. La reacción en cadena y los procesos de separación química fueron investigados en los laboratorios de Clinton a principios de noviembre de 1943 y se produjo una cantidad apreciable de plutonio en el mismo lugar.

8.76. La construcción de una planta de producción mediana en Hanford, Wáshington, fué empezada en 1943 y la primera pila grande empezó en el mes de setiembre de 1944. La instalación entera estaba en función en el verano de 1945 con todas las pilas de reacción en cadena e instalaciones de separación química más perfeccionadas de lo que se había anticipado.

8.77. Extensos estudios fueron hechos sobre el empleo del agua pesada como regulador y se construyó una pila experimental que contenía agua pesada en el laboratorio de Argonne. Se hicieron planes para una instalación de producción que empleara agua pesada.

8.78. La sección de Sanidad se mostró activa en tres direcciones principales: 1) examen médico del personal; 2) opinión sobre los peligros de las radiaciones y verificación constante de las condiciones de trabajo; 3) investigación sobre los efectos de las radiaciones. Un plan cuidadoso y completo del trabajo de investigación de esta sección dió como resultado un nivel muy satisfactorio de salud en Hanford y en otros lugares del proyecto.

Capítulo IX

DISCUSIÓN GENERAL SOBRE LA SEPARACIÓN DE ISÓTOPOS

NOTA PRELIMINAR

9.1. La posibilidad de producir una bomba atómica de U-235 fué puesta en evidencia antes del descubrimiento del plutonio. Puesto que se pensaba desde tiempo atrás que la separación de los isótopos de uranio sería el eslabón principal y directo hacia la fabricación de tal bomba, fueron examinados los métodos de separación de los isótopos del uranio por lo menos durante seis años. Tampoco se limitó el estudio al uranio desde que se puso en evidencia que la separación del deuterio era también de gran importancia. En el presente capítulo se tratarán los problemas generales de la separación de los isótopos; en los capítulos siguientes se fijará la aplicación específica de los diversos procesos.

FACTORES QUE AFECTAN LA SEPARACIÓN DE LOS ISÓTOPOS

9.2. Por definición, los isótopos de un elemento difieren en la masa pero no en las propiedades químicas. Más precisamente, aunque difieran las masas nucleares y las estructuras, las cargas nucleares son idénticas y por lo tanto las estructuras electrónicas exteriores son prácticamente idénticas. Por eso, para la mayoría de los fines prácticos, los isótopos de un

elemento son separables sólo por procesos que dependen de la masa nuclear.

9.3. Es bien conocido que las moléculas de un gas o de un líquido que se halla en movimiento continuo y que su energía cinética media depende solamente de la temperatura, y no de las propiedades químicas de las moléculas. Así, en un gas constituído de una mezcla de dos isótopos la energía cinética media de las moléculas livianas y de las pesadas es la misma. Puesto que la energía cinética de una molécula es $1/2\, mv^2$, donde m es la masa y v la velocidad de la molécula, resulta claro que la velocidad media de una molécula más liviana tiene que ser más grande que la de una molécula más pesada. Por lo tanto, por lo menos en principio, todo proceso que depende de la velocidad media de las moléculas puede emplearse para la separación de isótopos. Desgraciadamente, la velocidad media es inversamente proporcional a la *raíz cuadrada* de la masa, por lo que la diferencia es muy pequeña para los compuestos gaseosos de los isótopos del uranio. Además, aunque las velocidades *medias* difieren, los coeficientes de velocidad muestran una considerable superposición. En el caso del gas hexafluoruro de uranio, por ejemplo, más del 49 % de las moléculas livianas poseen velocidtades tan bajas como las del 50 % de las moléculas pesadas.

9.4. Naturalmente no hay posibilidad de aplicar directamente fuerzas mecánicas a las moléculas individualmente; éstas no pueden ser empujadas con un bastón o tiradas con una cuerda. Sin embargo, están sometidas a campos de *gravitación* y, si ionizadas, pueden ser afectadas por campos eléctricos y magnéticos. Las fuerzas de *gravitación* son, naturalmente, proporcionales a la masa. En un alto vacío muy elevado los átomos de U-235 y los átomos de U-238 caerían con la misma aceleración, pero exactamente como una pluma y una piedra caen con ley muy distinta en el aire donde existen fuerzas de rozamiento que se oponen al movimiento, pueden existir condiciones bajo las cuales una combinación de fuerzas gravitacionales y que se oponen a las fuerzas moleculares contribuirá a mover los átomos pesados en forma distinta de los livianos. Los campos eléctricos y magnéticos son más fácil-

mente controlados que los campos de gravitación o campos "pseudogravitacionales" (es decir campos de fuerzas centrífugas) y son muy eficaces en la separación de iones de las distintas masas.

9.5. Entre las fuerzas gravitacionales o electromagnéticas, existen, naturalmente, fuerzas interatómicas e intermoleculares. Estas fuerzas gobiernan la interacción de las moléculas y por lo tanto influyen sobre las leyes de las reacciones químicas, sobre los procesos de evaporación, etcétera. Por lo general, tales fuerzas influyen sobre los electrones exteriores de las moléculas y no sobre las masas nucleares. Sin embargo, cuando las fuerzas entre átomos separados o moléculas llevan a la formación de nuevas moléculas, tiene que aparecer un efecto de masa (por lo general muy pequeño). De acuerdo con las leyes de la mecánica cuántica, los niveles de energía de las moléculas son ligeramente alterados, y en forma distinta para cada isótopo. Tales efectos tienen que alterar ligeramente el comportamiento de los dos isótopos en ciertas reacciones químicas, como luego veremos, aunque la diferencia en el comportamiento es mucho más pequeña que las diferencias conocidas del comportamiento químico entre un elemento y otro.

9.6. Éstos, pues, son los factores principales que se habían podido considerar en el proyecto de un proceso de separación: la igualdad de energía térmico-cinética media de las moléculas a una temperatura dada, los efectos gravitacionales o centrífugos proporcionales a las masas moleculares, las fuerzas eléctricas o magnéticas que afectan las moléculas ionizadas, y las fuerzas interatómicas o intermoleculares. En algunos procesos de separación de isótopos sólo está implícito uno de estos efectos y entonces puede preverse la proporción de separación. En otros procesos de separación de los isótopos cierto número de estos efectos ocurre simultáneamente, por lo que es difícil hacer previsiones.

CRITERIO PARA EVALUAR UN PROCESO DE SEPARACIÓN

9.7. Antes de referirnos a los procesos convenientes para la separación de los isótopos, tenemos que saber lo qué se ne-

cesita. Los principales criterios que deben emplearse para juzgar un proceso de separación de los isótopos son los siguientes.

FACTOR DE SEPARACIÓN

9.8. El factor de separación, a veces conocido como factor de enriquecimiento o de fraccionamiento de un proceso, es la relación entre la concentración relativa del isótopo deseado después del proceso y su relativa concentración antes del proceso. Definiendo con más precisión: si, antes del proceso, los número de átomos de los isótopos de número de masa m_1 y m_2 son respectivamente n_1 y n_2 (por gramo de mezcla isotópica) y si, después del proceso, los números correspondientes son n'_1 y n'_2, entonces el factor de separación es

$$r = \frac{n'_1 / n'_2}{n_1 / n_2}$$

Esta definición puede aplicarse a una etapa de una instalación de separación o a una instalación completa que consista de muchas etapas. Comúnmente interesa ya sea el factor de separación en el proceso "de una sola etapa", ya sea el factor de separación "total del proceso global. Si "r" es tan sólo ligeramente mayor que la unidad, como ocurre a menudo en una sola etapa, el número $r - 1$ es a veces más útil que r. La cantidad $r - 1$ se llama factor de enriquecimiento. En el uranio natural $m_1 = 235$, $m_2 = 238$ y $n_1/n_2 = 1/140$ aproximadamente, pero en el 90 % de U-235 $n'_1/n'_2 = 9/1$. Por consiguiente, en un proceso que produzca el 90 % de U-235 desde el uranio natural el máximo valor de r debe ser más o menos 1,260.

RENDIMIENTO

9.9. En casi todos los procesos un factor elevado de separación significa un bajo rendimiento, hecho éste que entraña una solución de compromiso. A menos que no se den indicaciones contrarias, calcularemos los rendimientos en términos

de U-235. Así un dispositivo de separación con un factor de separación de 2 — es decir, $n'_1/n'_2 = 1/70$ — y un rendimiento de un gramo por día, significa, partiendo del uranio natural, que produce, en un día, material que consiste en un gramo de U-235 mezclado con 70 gramos de U-238.

CIRCULANTE

9.10. La cantidad total de material presente en la instalación de separación se llama "circulante". El "circulante" puede ser muy grande en una instalación que consiste de muchas etapas.

TIEMPO DE ARRANQUE

9.11. En una instalación de separación que tiene un gran circularite se necesita mucho tiempo —tal vez semanas o meses— para alcanzar condiciones estables de trabajo. En los programas que calculan el tiempo este tiempo de "arranque" o de "régimen" tiene que agregarse al tiempo de construcción de la instalación.

EFICIENCIA

9.12. Si se proporciona una cierta cantidad de material bruto a una instalación de separación, una parte de material se enriquecerá, una parte se empobrecerá y una parte quedará invariada. Partes de cada una de estas tres fracciones se perderán y partes se recobrarán. La importancia de una recuperación de gran eficiencia del material enriquecido es evidente. En algunos procesos la cantidad del material invariado es despreciable pero en otros casos, sobre todo en el método electromagnético que describiremos más abajo, ésta constituye la fracción más grande y, por consiguiente, la eficiencia con que puede ser recuperada para ponerla otra vez en el ciclo de trabajo, es sumamente importante. La importancia de recuperación del material empobrecido varía mucho, puesto que depende sobre todo del grado de empobrecimiento. Así que, por lo general hay que tener en cuenta muchas eficiencias distintas.

COSTO

9.13. Como en todas las partes del proyecto de uranio el costo en tiempo era más importante del costo en dinero. Por consiguiente se construyeron un buen número de instalaciones para la separación en gran escala del U-235 y del deuterio a un costo mayor de lo que habría sido necesario si la construcción hubiera podido ser aplazada en muchos meses o años hasta que hubiera sido llevado a término un proceso más adecuado.

ALGUNOS PROCESOS DE SEPARACIÓN - DIFUSIÓN GASEOSA

9.14. Ya en el año 1896 Lord Rayleigh había mostrado que una mezcla de dos gases de peso atómico distinto puede ser parcialmente separada empleando un dispositivo que permita la difusión a través de una membrana porosa en un espacio evacuado. Debido a su mayor velocidad media las moléculas del gas liviano se difunden a través de la barrera más rápidamente, así que el gas que ha pasado a través de la membrana (esto es el gas "filtrado") se halla enriquecido del constituyente más liviano y el gas residual que no ha pasado se halla empobrecido por pérdida del constituyente más liviano. El gas más altamente enriquecido del constituyente más liviano es el llamado "filtrado instantáneo"; ésta es la parte que ha sido difundida antes que el empobrecimiento del residuo se haya vuelto apreciable. Si el proceso de difusión continúa hasta que casi todo el gas haya pasado a través de la barrera, el enriquecimiento medio del filtrado disminuye. En el próximo capítulo consideraremos estos fenómenos más en detalle. Queremos aquí subrayar principalmente considerando que los coeficientes de difusión son inversamente proporcionales a las raíces cuadradas de los pesos moleculares, el factor de separación para el filtrado instantáneo, llamado "factor ideal de separación" alfa, es dado por

$$a = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}}$$

donde M_1 es el peso molecular del gas más liviano y M_2 el del más pesado. Aplicando esta fórmula al caso del uranio, veremos la magnitud del problema de la separación. Debido a que el uranio mismo no es un gas, hay que emplear algún compuesto gaseoso del uranio. El único que se presta es el hexafluoruro de uranio UF_6, que posee una presión de vapor de una atmósfera a la temperatura de 56°C. Como el fluor posee un solo isótopo los dos hexafluoruros importantes de uranio son el $U^{235}F_6$ y $U^{238}F_6$; sus pesos moleculares son, respèctivamente: 349 y 352. Así que si una pequeña fracción de una cantidad de hexafluoruro de uranio es difundida a través de una barrera porosa, el filtrado se enriquecerá en $U^{235}F_6$ de un factor

$$\alpha = \sqrt{352/349} = 1{,}0043$$

que se halla muy lejos del valor requerido 1,260 (véase párrafo 9.8.).

9.15. Tales cálculos pueden hacer creer que la separación de isótopos no es realizable (con excepción tal vez de los isótopos de hidrógeno) empleando procesos por difusión. Sin embargo, estos métodos pueden ser empleados con éxito aun para el uranio. Fué el método por difusión gaseosa el que F. W. Aston empleó en una primera separación parcial de isótopos (se trataba de isótopos del neón). Más tarde G. Herz y otros, operando unidades difusoras de etapas múltiples y cíclicas, pudieron alcanzar la separación prácticamente total de los isótopos del neón. Puesto que el sistema de etapas múltiples cíclicas es indispensable para casi todos los métodos de separación, lo describiremos con algún detalle luego de una observación previa sobre los distintos métodos a que aquél se refiere.

DESTILACIÓN FRACCIONADA

9.16. La separación de los compuestos que tienen distintos puntos de ebullición, es decir, distintas presiones de vapor por medio de la destilación, constituye un proceso industrial muy conocido. La separación del alcohol y el agua (cuya diferencia de punto de ebullición es alrededor de 20°C.) se

efectúa comúnmente en un sencillo alambique empleado como único evaporador y condensador. El material condensado (el condensado), puede ser recogido y redestilado varias veces, si es necesario. Para la separación de compuestos de puntos de ebullición muy cercanos uno de otro sería demasiado trabajo efectuar el número necesario de evaporaciones y condensaciones sucesivas como operaciones separadas. Entonces se efectúa una separación continuada en la torre de fraccionamiento. El objeto de una torre de fraccionamiento consiste principalmente en producir un chorro de vapor dirigido hacia arriba y un chorro de líquido dirigido hacia abajo, estando así los dos chorros en contacto íntimo intercambiando constantemente las moléculas. Las moléculas de la fracción que tiene el punto de ebullición más bajo se caracterizan por una tendencia relativamente mayor a entrar en el chorro de vapor y viceversa. Tales métodos de destilación contra-corriente pueden aplicarse a la separación del agua liviana y pesada, cuya diferencia de punto de ebullición es de 1,4°C.

APLICACIÓN GENERAL DEL FLUJO CONTRACORRIENTE

9.17. El método de flujo contracorriente es útil no solamente en los procesos de destilación de dos fases (líquido-gas), sino también en otros procesos de separación como aquellos que implican la difusión resultante de las variaciones de temperatura (gradientes) en sistemas de una sola fase o proveniente de las fuerzas centrífugas.

Las contracorrientes pueden consistir en dos gases, dos líquidos, o de un gas y un líquido.

LA CENTRÍFUGA

9.18. Hemos señalado que la separación por gravedad de dos isótopos puede producirse debido a que las fuerzas gravitacionales que tienden a mover las moléculas hacia abajo son proporcionales a los pesos moleculares, y las fuerzas intermoleculares que tienden a oponerse al movimiento hacia abajo dependen de la configuración electrónica, y no de los

pesos moleculares. Puesto que la centrífuga es esencialmente un método de aplicación de fuerzas pseudogravitacionales de gran magnitud, fué considerada desde el principio como un método para la separación de isótopos. Sin embargo, el primer experimento con centrífugas falló. Un ulterior desarrollo de la centrífuga de alta velocidad por J. W. Beams y otros, llevó al éxito. H. C. Urey aconsejó el empleo de altas centrífugas cilíndricas con flujo contracorriente; tales centrífugas se utilizaron con éxito.

9.19. En tales centrífugas con contracorriente existe un flujo de vapor dirigido hacia abajo en la parte externa del cilindro giratorio y un flujo de vapor hacia arriba en la región central o axil. A través de la región intermedia entre las dos corrientes hay una difusión constante de ambos tipos de moléculas desde una corriente a la otra, pero el campo de fuerza radial de la centrífuga actúa más fuertemente sobre las moléculas pesadas que sobre las livianas, de modo que la concentración de las moléculas pesadas aumenta en la región periférica y disminuye en la región axil; y viceversa para las moléculas livianas.

9.20. La gran ventaja de la centrífuga en la separación de los isótopos pesados como el uranio consiste en que el factor de separación depende de la diferencia entre las masas de los dos isótopos, y no de la raíz cuadrada de la relación de las masas como en los métodos de difusión.

MÉTODO DE DIFUSIÓN TÉRMICA

9.21. La teoría cinética de los gases predice el alcance de las diferencias en las relaciones de difusión de gases de distintos pesos moleculares. La posibilidad de conseguir una separación práctica de isótopos por medio de la difusión térmica fué primero vislumbrada por estudios teóricos de los detalles de las colisiones moleculares y de las fuerzas entre moléculas. Tales estudios efectuados por Enskog y por Chapman antes de 1920, sugirieron que de existir un gradiente de temperatura en una mezcla de gas, existiría para un tipo de molécula una tendencia a concentrarse en la región fría y

para otro tipo en la región caliente. Esta tendencia depende no solamente de los pesos moleculares sino también de las fuerzas entre las moléculas. Si el gas es una mezcla de dos isótopos, el isótopo más pesado puede acumularse en la región caliente o en la fría o no acumularse en absoluto, de acuerdo con la naturaleza de las fuerzas intermoleculares. En efecto, el sentido de separación puede invertirse a medida que se altere la temperatura o la concentración relativa.

9.22. Tales efectos de difusión térmica fueron empleados por primera vez por H. Clusius y G. Dickel, en Alemania, en 1938 para la separación de isótopos. Ellos construyeron un tubo vertical que contenía un alambre calentado, tendido a lo largo del eje del tubo y que producía una diferencia de temperatura de más o menos 600°C. entre el eje y la periferia. El efecto era doble. En primer lugar, los isótopos pesados (en las substancias que ellos estudiaban), se concentraban cerca de la pared externa fría, y en segundo lugar, el gas frío en la parte externa tendía a bajar mientras que el gas caliente en el eje tendía a subir. Esta conversión térmica establecía un flujo de contracorriente, y la difusión térmica provocaba un flujo en su mayor parte de moléculas pesadas hacia afuera a través de la parte intermedia entre las dos corrientes.

9.23. La teoría de la difusión térmica en los gases es bastante complicada; la de la difusión térmica en los líquidos es prácticamente imposible. Un efecto de separación, sin embargo, debe existir, y ha sido empleado con éxito en la separación de los hexafluoruros de uranio livianos y pesados.

MÉTODO DE CANJE QUÍMICO

9.24. En la introducción de este capítulo hemos puntualizado que existían razones para esperar que la separación de los isótopos se pudiera efectuar por medio de reacciones químicas comunes. En efecto, se encontró que en simple reacción de canje entre compuestos de dos isótopos distintos el llamado equilibrio constante no era absolutamente cierto, de manera que en reacciones de ese tipo puede ocurrir la separa-

ción. Por ejemplo, en el canje catalítico de los átomos de hidrógeno entre gas hidrógeno y agua, el agua contiene una concentración de deuterio entre tres y cuatro veces tan grande como el gas hidrógeno en equilibrio con él. Con el hidrógeno y el vapor de agua el efecto es del mismo tipo general, pero el equilibrio es restablecido más rápidamente. Es posible adaptar este método a un equipo de flujo continuo contracorriente como el empleado en la destilación, y tales arreglos se emplean ahora para la producción del agua pesada. El método general es bien conocido, y los efectos de la separación se sabe que decrecen, por lo general, con el aumento del peso molecular, así que hay poca posibilidad de aplicar este método con éxito en el caso de los isótopos pesados como el uranio.

MÉTODO ELECTROLÍTICO

9.25. El método electrolítico de separación de isótopos resultó del descubrimiento de que el agua contenida en las células electrolíticas empleadas en la producción comercial corriente del hidrógeno y del oxígeno tenía una concentración aumentada de moléculas de agua pesada. Todavía no se ha llegado a dar una completa explicación del efecto. Antes de la guerra prácticamente la producción entera de hidrógeno pesado se hacía con el método electrolítico. La más grande producción era la de Noruega, pero en los Estados Unidos se producía hidrógeno pesado en cantidad suficiente para fines experimentales.

MÉTODOS ESTADÍSTICOS EN GENERAL

9.26. Los seis métodos de separación de isótopos que hemos descrito (difusión, destilación, centrifugación, difusión térmica, reacciones de canje, electrolisis), todos han sido probados con cierto éxito en el caso del uranio o del hidrógeno o de ambos. Cada uno de estos métodos se basa sobre pequeñas diferencias en el comportamiento *medio* de las moléculas de isótopos distintos. Puesto que una media es por definición, un asunto estadístico, todos aquellos métodos que dependen

fundamentalmente del comportamiento medio se llaman métodos estadísticos.

9.27. Con respecto al criterio establecido para juzgar de los procesos de separación, los seis métodos estadísticos son más o menos similares. En cada caso el factor de separación, es pequeño, así que se requieren muchas etapas sucesivas de separación. En la mayor parte de los casos, cantidades relativamente grandes de material pueden ser manipuladas en instalaciones de tamaño reducido. Los valores del mantenimiento y del tiempo de arranque varían considerablemente, pero son por lo general elevados. La semejanza de los seis métodos hace imprudente la elección final del método sin haber antes estudiado en detalle el isótopo especial, el valor de producción, etcétera, requerido. Los métodos de reacción de canje y de electrolisis probablemente no son adecuados en el caso del uranio, y ningún plan del método de destilación para el uranio ha subsistido. Todos los otros métodos se han desarrollado con mayor o menor éxito para el uranio, pero no han sido empleados para el hidrógeno.

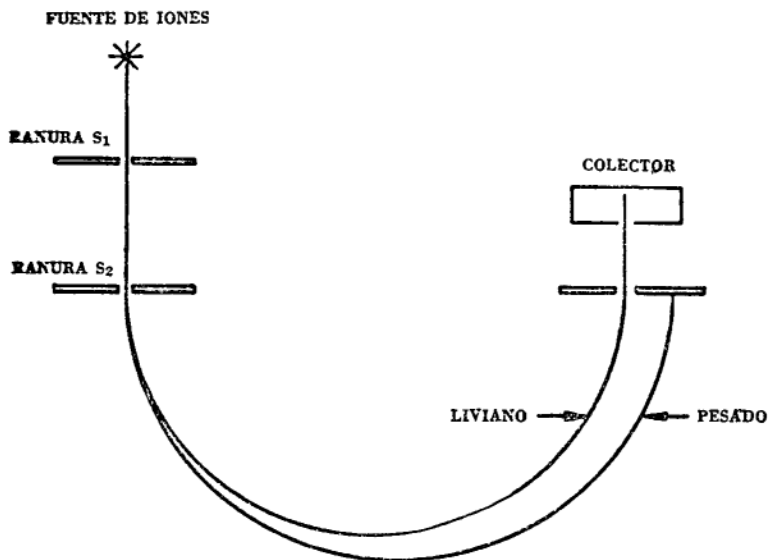
EL MÉTODO ELECTROMAGNÉTICO Y SUS LIMITACIONES

9.28. La existencia de isótopos no radioactivos fué demostrada por primera vez durante el estudio del comportamiento de las moléculas de gas ionizado que se mueven a través de campos eléctricos y magnéticos. Son justamente estos campos los que forman la base del llamado método espectográfico de masa o electromagnético para la separación de isótopos. Este método es el más adecuado para determinar la abundancia relativa de muchos tipos de isótopos. El método es empleado comúnmente para determinar los resultados de los métodos de separación de los isótopos del uranio que ya hemos descripto.

La razón por la cual el método es tan útil, es que permite efectuar una casi completa separación de los isótopos con pequeñas cantidades y en poco tiempo. De ser así bien puede preguntarse por qué han sido considerados otros métodos. La contestación es que un espectrógrafo de masa ordinario puede

tratar sólo cantidades muy pequeñas de material, comúnmente del orden de las fracciones de microgramo por hora.

9.29. Para entender la razón de esta limitación del rendimiento, tenemos que describir el principio de la operación de un tipo simple de espectógrafo de masa por primera vez em-



El campo magnético es perpendicular al plano del dibujo

pleado por A. J. Dempester en 1918. Este instrumento se indica esquemáticamente en la figura anterior. El compuesto gaseoso que ha de ser separado se introduce en la fuente de iones donde una parte de sus moléculas son ionizadas por una descarga eléctrica. Algunos de estos iones pasan a través de la ranura s_1. Entre s_1 y s_2 son acelerados por un campo eléctrico que les entrega prácticamente la misma energía cinética, millares de veces superior a su energía térmica media. Como,

en consecuencia, poseen todas prácticamente la misma energía cinética, los iones más livianos poseen cantidades de movimientos menores que los iones pesados. Al ingresar en el campo magnético todos los iones se desplazarán perpendicularmente al campo magnético recorriendo una semicircunferencia de radio proporcional a sus momentos. Luego los iones livianos se desplazarán a lo largo de semicírculos más pequeños que los pesados, de manera que para una cierta posición del colector, sólo los iones livianos serán recogidos.

9.30. Dejando para después una discusión detallada de un sistema semejante de separación, podemos destacar las principales circunstancias que limitan la cantidad de material que puede hacerse pasar por éste. Éstas son tres: Primera: es difícil producir grandes cantidades de iones gaseosos. Segunda: se emplea un haz de iones muy fino (como se indica en el caso tratado), así que sólo una pequeña fracción de los iones producidos es empleada. Tercera: una densidad demasiado elevada de iones en el haz puede producir efectos de carga espacial que interfieren la acción que tiende a separarlos. Los métodos electromagnéticos desarrollados antes de 1941 poseen un factor de separación muy elevado, pero las cantidades producidas y las eficiencias son muy bajas. Éstas fueron las razones que, antes del verano de 1941, llevaron al Comité de Uranio a excluir estos métodos para la separación en gran escala del U-235 (véase el párrafo 4.31). Desde esta época se puso en evidencia que estas limitaciones no son insuperables. En efecto, las primeras muestras apreciables de U-235 puro fueron producidas mediante un separador electromagnético que describiremos en el próximo capítulo.

OTROS MÉTODOS PARA SEPARAR LOS ISÓTOPOS

9.31. Además de los métodos de separación antes descritos, muchos otros métodos fueron ensayados. Éstos incluyen el método por movilidad iónica, que, como lo indica el nombre, se basa sobre el siguiente hecho: En una solución electrolítica dos iones químicamente idénticos pero de masas distintas, se desplazan a través de la solución a distinta velocidad bajo

la acción del campo eléctrico. Sin embargo, la diferencia de movilidad es pequeña y fácilmente enmascarada por efectos parásitos. A. K. Brewer, del Bureau of Standards, comunicó que había podido separar los isótopos del potasio empleando este método. Brewer obtuvo también resultados interesantes empleando el método por evaporación. En el capítulo XI se describen dos métodos electromagnéticos nuevos, el isotrón y el por centrifugación de iones. El isotrón produce un número de muestras de discreto tamaño de uranio parcialmente separado. La centrifugación de los iones también produce muestras de uranio separado, pero la acción de éstos es insegura.

PROCESOS COMBINADOS Y EN CASCADA

9.32. En todos los métodos estadísticos para separar isótopos son necesarias muchas etapas sucesivas de separación para conseguir que el material contenga el 90 % o más de U-235 o de deuterio. Tales series de etapas sucesivas de separación son llamadas una cascada si el flujo es continuo desde una etapa a la sucesiva. (Una torre subdividida por platos separados tal como ha sido descripta, es un ejemplo de una simple cascada de unidades de separación). Un análisis completo de los problemas de una cascada puede ser presentado en términos generales. Éste ha sido estudiado por R. P. Freymann, de Princeton y otros, en lo que se refiere a cierto tipo de separador electromagnético, y por K. Cohen y I. Kaplan de la Universidad de Columbia, por M. Benedict y A. M. Squires de la Kellex Corporation y otros, para los procesos por difusión. Ahora podemos fijar la atención sólo sobre dos puntos acerca de las instalaciones a etapa múltiple o "cascadas".

9.33. El primer punto es que tiene que haber una operación cíclica. Considerando una instalación de separación de U-235, el material que llega en cada etapa después de la primera ya ha sido enriquecido en U-235. Parte de este material suministrado puede haber sido previamente enriquecido pasando a través de la etapa considerada. El residuo estará típicamente empobrecido, pero no tan empobrecido como para no tener ya valor. Éste debe ser devuelto a la primera etapa y vuelto a poner en el ciclo. Aun el material empobrecido por

la primera etapa (la menos enriquecida), puede ser útilmente puesto de nuevo en el ciclo; una parte de U-235 aún contenida por éste puede ser recobrada (exprimida).

9.34. El segundo punto es que el problema de la vuelta al ciclo varía mucho en las etapas más elevadas (más enriquecidas). Considerando uniforme la operación en la etapa, vemos que el flujo de uranio a través de la primera etapa debe ser por lo menos 140 veces mayor que a través de la última etapa. El flujo en cada etapa dada es proporcional a la concentración relativa de U-238 y decrece por lo tanto con el número de etapas anteriores. Como toda muestra dada de material es vuelta a poner en el ciclo muchas veces, la cantidad de material que ha sufrido el proceso en cada etapa es mucho mayor que el flujo a través de esta etapa pero es proporcional a éste.

9.35. Recordamos estos puntos para ilustrar un aspecto del problema de la separación que no siempre es evidente, o sea que el proceso de separación que se presenta como el mejor para una etapa inicial de separación no es necesariamente el mejor para una etapa final. Factores tales como los que hemos recordado difieren no sólo de etapa a etapa sino de proceso a proceso. Por ejemplo, la vuelta al ciclo es mucho más simple en una instalación por difusión que en una electromagnética. Una instalación que utiliza dos o más procesos bien puede ser la mejor para lograr la mejor separación requerida. En las etapas iniciales (más grandes), el tamaño de los aparatos y la potencia requerida para éstos pueden determinar la elección del proceso. En las etapas finales (más pequeñas), estos factores son superados por la conveniencia de la operación y por el tiempo de circulación, que pueden orientar hacia un proceso distinto.

INSTALACIONES DE AGUA PESADA - INSTALACIÓN EXPERIMENTAL DE CENTRIFUGACIÓN

9.36. Los dos próximos capítulos están dedicados a la descripción de los tres métodos empleados para la separación en gran escala de los isótopos del uranio. Éstas son las únicas

instalaciones para la separación de isótopos que se han vuelto de la máxima importancia para el proyecto hasta la fecha. En un primer tiempo parecía seguro que la centrifugación pudiera ser el mejor método para separar los isótopos del uranio y que se habría necesitado agua pesada como regulador. Describiremos brevemente la instalación experimental de centrifugación y las instalaciones para la producción de agua pesada.

LAS INSTALACIONES DE AGUA PESADA

9.37. Dos métodos se emplearon para la concentración del deuterio. Éstos fueron la destilación fraccionada del agua y el método de reacción por intercambio hidrógeno-agua.

9.38. El primero de éstos sigue los métodos bien establecidos de destilación fraccionada con la excepción de que se requiere una destilación muy intensa, porque la diferencia de punto de ebullición entre agua liviana y pesada es muy pequeña. Además, debido a esta pequeña diferencia, la cantidad de vapor que se necesita es muy grande. El método es muy costoso debido a estos dos factores, aunque se pudo construir instalaciones con un mínimo de trabajo de desarrollo. Las instalaciones fueron empezadas por du Pont en enero de 1943 y puestas en marcha alrededor de enero de 1944.

9.39. El segundo método para la preparación de agua pesada se basa en el intercambio catalítico de deuterio entre hidrógeno y agua. Cuando se establece un tal intercambio por medio de catalizadores, la concentración del deuterio en el agua es mayor que en la del gas de un factor de más o menos tres veces como el que acabamos de ver.

9.40. En este proceso el agua es enviada en una torre y fluye en contracorriente con el hidrógeno y el vapor en una forma complicada. En la parte alta de la torre el agua es transformada en gas hidrógeno y oxígeno en células electrolíticas y el hidrógeno es restituído a la parte alta de la torre mezclado con el vapor. La mezcla de vapor o hidrógeno pasa a través de las capas de catalizador y burbujea a través del agua que fluye hacia abajo. En esencia, parte del deuterio originalmente en el hidrógeno se concentra en el vapor y luego

es transferido al agua que fluye hacia abájo. La instalación que describimos consiste en una cascada de torres con las torres más grandes al final de la alimentación y las torres más pequeñas al final de la producción. Esta cascada sigue el mismo principio general que hemos establecido antes a propósito de los problemas generales de separación. Este proceso requiere la seguridad de catalizadores muy activos para las reacciones del intercambio. El catalizador más efectivo es del tipo descubierto por H. S. Taylor, de la Universidad de Princeton; un segundo tipo menos activo fué descubierto por A. von Grosse. En el desarrollo de estos catalizadores R. H. Crist, de la Universidad de Columbia, hizo las determinaciones necesarias de las constantes físicas, y H. R. Arnold, de la du Pont, realizó la investigación sobre uno de los catalizadores.

9.41. Este proceso representó una operación económica. La instalación fué establecida cerca de los trabajos de la "Consolidated Mining and Smelting Co." en Trail, Columbia Británica (Canadá), debido a la necesidad de emplear hidrógeno electrolítico. La construcción de la instalación se hizo bajo la dirección de E. V. Murphree y F. T. Barr, de la "Standard Oil Development Co.".

LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL DE CENTRIFUGACIÓN

9.42. Durante mucho tiempo, al comienzo del proyecto los métodos por difusión gaseosa y por centrifugación fueron considerados los dos métodos de separación que ofrecían la mayor probabilidad de éxito para el uranio. Ambos presentaban dificultades de realización en gran escala. Después de la reorganización, en diciembre de 1941, prosiguió la investigación y el desarrollo del método por centrifugación en la Universidad de Virginia y en el Laboratorio de la Standard Oil Development Co., en Bayway. La más grande tarea emprendida por la "Westinghouse Electric y Manufacturing Co.", de Pittsburgo, fué la de hacer grandes centrífugas capaces de girar a velocidades muy elevadas.

9.43. Debido a la magnitud de los problemas de ingeniería implícitos no fué autorizada la construcción de una instala-

ción en gran escala, sino la de una instalación experimental que fué establecida en Bayway. Funcionó con éxito y dió aproximadamente el grado de separación previsto por la teoría. Más tarde esta instalación fué cerrada y el trabajo sobre el método por centrifugación fué interrumpido. Por esta razón en este informe no aparece una ulterior exposición sobre el particular.

LA SEPARACIÓN DEL ISÓTOPO COMPARADA CON LA PRODUCCIÓN DEL PLUTONIO

9.44. Los métodos más importantes para separar el isótopo que han sido descritos eran conocidos en su principio y habían sido llevados a la práctica antes que la separación de los isótopos de uranio se volviera de importancia fundamental. Ellos no fueron aplicados al uranio sino para la separación de unos pocos microgramos, y no han sido aplicados a ninguna substancia en una escala comparable con la requerida por la circunstancia. Pero las cuestiones fundamentales eran de precio, eficiencia y tiempo, y no de principio; en otras palabras, el problema era fundamentalmente técnico y no científico. El problema de la producción de plutonio no alcanzó una situación similar hasta después que la primera pila con reacción en cadena autosostenida funcionó y se llegó a separar los primeros microgramos de plutonio. Aun después de esta etapa muchos de los experimentos hechos en el proyecto del plutonio resultaron de vital interés para el empleo militar, ya sea del U-235 o del plutonio, y para el futuro desarrollo de la energía nuclear. Por consiguiente, el proyecto del plutonio siguió presentando un interés más general que el proyecto de la separación de los isótopos. En los proyectos de separación surgieron muchos problemas especiales extremadamente interesantes y que requerían un alto grado de habilidad científica para resolverlos, pero que tienen que ser mantenidos en secreto. Precisamente por estas razones, el presente informe, que no es técnico, dió mayor importancia al proyecto del plutonio y ha dejado menor espacio a los proyectos de separación. Esto no significa que el problema de la sepa-

ración fuera más fácil de resolver o que su solución fuera menos importante.

RESUMEN

9.45. Exceptuando los separadores electromagnéticos, la separación de isótopos depende de pequeñas diferencias en el comportamiento medio de las moléculas. Estos efectos son utilizados en seis métodos de separación "estadísticos": (1) difusión gaseosa, (2) destilación, (3) centrifugación, (4) difusión térmica, (5) reacciones por intercambio, (6) electrólisis. Probablemente tan sólo el (1), (3) y (4) son adecuados para el uranio; el (2), (5) y (6) son preferidos para la separación del deuterio del hidrógeno. En todos estos métodos "estadísticos", el factor de separación es pequeño, por lo que se requieren muchas etapas, y en el caso específico de un método pueden ser requeridas muchas cantidades de material. Todos estos métodos han sido ensayados con algún éxito antes de 1940; sin embargo, ninguno había sido empleado en gran escala y ninguno había sido aplicado al uranio. La escala de producción mediante métodos electromagnéticos era menor pero el factor de separaciión era mayor. Existían evidentes limitaciones de escala para el método electromagnético. Se presumía que había ventaja en combinar dos o más métodos debido a las diferencias en la realización de la separación en las diferentes etapas. El problema de desarrollar algunos o todos estos métodos de separación no dependía de un principio científico sino técnico de escala y de costo. Estos desarrollos pueden ser expuestos más brevemente que aquellos que se refieren al proyecto de plutonio, aunque los primeros no son menos importantes. Una instalación experimental de centrifugación fué construída y funcionó con éxito. No fué construída una instalación en gran escala. Fueron establecidas instalaciones para la producción de agua pesada basadas en dos diferentes métodos.

Capítulo X

LA SEPARACIÓN DE LOS ISÓTOPOS DEL URANIO POR DIFUSIÓN GASEOSA

INTRODUCCIÓN

10.1. En febrero de 1940 se consiguieron pequeñas cantidades de fracciones concentradas de los tres isótopos del uranio de masas respectivas 234, 235 y 238, obtenidas por A. O. Nier mediante el empleo de su espectrómetro de masa. Se hizo entrega de éstas a E. T. Booth, A. von Grosse y J. R. Dunning para que fueran investigadas con el ciclotrón de la Universidad de Columbia. Estos especialistas muy pronto demostraron que el U-235 era el isótopo suceptible de fisión por medio de neutrones térmicos. Era natural, por ende, que este grupo encabezado por Dunning se interesara más que nunca en la separación en gran escala de los isótopos del uranio.

10.2. El método por difusión, a lo que parece, fué en un comienzo revisado seriamente por Dunning en un memorándum a G. B. Pegram, que fué enviado a L. J. Briggs a fines de 1940. Este memorándum resumía las investigaciones preliminares que habían sido continuadas por E. T. Booth, A. von Groose y J. R. Dunning. En 1941 el trabajo fué acelerado mediante una ayuda económica lograda en virtud de un contrato que H. C. Urey recibió de la Armada para estudiar la separación de isótopos principalmente por el método de

centrifugación. Durante este período, F. G. Slack, de la Universidad de Vanderbilt, y W. F. Libby, de la Universidad de California, se incorporaron al grupo. Un contrato O S R D (O E Msr-106) con el fin específico de estudiar la difusión, se hizo efectivo el 10 de julio de 1941 y tuvo validez por un año. Hasta la primavera de 1945 el trabajo fué proseguido mediante una serie de contratos de la O S R D y de la Armada en número creciente. Hasta mayo de 1943 Dunning estuvo directamente a cargo de este trabajo. A Urey se le confiaron los métodos estadísticos en general. Desde este tiempo hasta febrero de 1945 el trabajo de difusión de la Columbia estuvo a cargo directamente de Urey, mientras Dunning continuaba como director de una de las más importantes secciones. El 10 de marzo de 1945 dejó de trabajar en la Columbia por resolución de la Carbide and Carbon Chemicals Co. A comienzos de 1942, por sugestión de E. W. Murphree la M. W. Kellogg Co. fué llevada a desarrollar instalaciones destinadas a la producción en gran escala de equipos para la instalación por difusión y a construir eventualmente una instalación en plena escala. Con el objeto de proseguir este programa fué constituída una nueva compañía subsidiaria que se llamó Kellex Co. En enero de 1943 se encomendó a la Carbide and Carbon Chemicals Co. la tarea de hacer funcionar la instalación.

10.3. Como dijimos en el capítulo IV, a fines de 1941 había sido demostrada la posibilidad, en principio, de separar los hexafluoruros de uranio por medio de una unidad de difusión de una sola etapa que empleara una barrera porosa (por ejemplo, una barrera obtenida atacando una hoja delgada de aleación zinc-plata con ácido clorhídrico). A pesar de haber desarrollado un trabajo considerable sobre barreras y bombas, no pudo hallarse un sistema del todo satisfactorio para una operación en gran escala. También K. Cohen empezó una serie de estudios teóricos, a los cuales ya nos referimos, para establecer la mejor manera de emplear el proceso por difusión, esto es, cuántas etapas serían requeridas, la extensión de la barrera necesaria, el volumen de gas que habría tenido que circular, etc. Los estudios teóricos y el proceso desarrollado

por M. Benedict, proporcionaron muchos cónocimientos en este campo y sirvieron de base para el proyecto de una instalación grande.

10.4. Los informes recibidos de Inglaterra y la visita del grupo inglés en el invierno 1941-1942, aclararon cierto número de puntos. En esta época los ingleses estaban planeando ellos mismos una instalación de separación por difusión, de manera que las discusiones con F. Simon, R. Peierls y otros fueron particularmente útiles.

LOS PRINCIPIOS DE LA SEPARACIÓN POR DIFUSIÓN

Una sola etapa de difusión

10.5. Como explicamos en el último capítulo, la velocidad de difusión de un gas a través de una pared porosa ideal es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de su peso molecular. Así que, si un gas, constituído por dos isótopos se difunde a través de una barrera en un recipiente evacuado, el isótopo más liviano (de peso molecular M_1) se difunde más rápidamente que el más pesado (de peso molecular M_2). El resultado por lo menos durante un espacio de tiempo muy corto, es que la concentración relativa del isótopo más liviano es mayor en la parte más alejada de la barrera que en la parte más cercana. Pero si el proceso continúa indefinidamente se acaba por establecer el equilibrio y las concentraciones se vuelven idénticas a ambos lados de la barrera. Aun si el gas filtrado (el gas que ha pasado a través de la barrera) es sacado por una bomba, la cantidad relativa de isótopo pesado que pasa a través de la barrera aumenta porque el isótopo liviano en la parte más cercana de la barrera ha sido eliminado por la primera parte de la difusión.

10.6. Para una sola operación de difusión el aumento de la concentración relativa del isótopo liviano en el gas filtrado comparado con el gas de que deriva, puede expresarse en términos de un factor de separación o de un factor de enriquecimiento *r-1*, ambos definidos en el párrafo 9.8. del capítulo anterior. Es posible escribir una ecuación muy simple que da *r-1* en función de los pesos moleculares y de la fracción

del gas original que ha sido difundido. Si esta fracción es muy pequeña, la ecuación se reduce a $r = \alpha$, que es el "factor de separación ideal" del párrafo 9.14. Si la fracción difundida es apreciable, la ecuación muestra la disminución de separación esperada. Por ejemplo, si la mitad del gas difunde $r - 1 = 0{,}69\ (\alpha - 1)$, o para el hexafluoruro de uranio $r = 1{,}003$, comparado con el valor 1,0043 cuando una pequeña fracción del gas original ha sido difundida.

LA CASCADA

10.7. Para separar los isótopos del uranio es preciso emplear muchas etapas sucesivas de difusión (esto es, una cascada), puesto que $\alpha = 1{,}0043$ para $U^{235}F_6$ y $U^{238}F_6$, cuya mezcla constituye un gas que se presta a separar uranio. Estudios de Cohen y otros han mostrado que el mejor dispositivo de flujo para etapas sucesivas es aquel en que la mitad del gas bombeado en cada etapa se difunde a través de la barrera, siendo la otra mitad empobrecida, devuelta para alimentar la etapa cercana anterior. Para un dispositivo semejante como vimos, el efecto de separación ideal entre la entrada y la salida de una sola etapa es 0,69 $(\alpha - 1)$. Este es a menudo llamado ϵ, o sea "el enriquecimiento total por etapa". Para los hexafluoruros de uranio en teoría es $\epsilon = 0{,}003$; pero en la práctica es un tanto inferior como resultado de la "difusión por atrás" o de la mezcla imperfecta del lado de las altas presiones o por las imperfecciones de la barrera. La primera separación experimental de los hexafluoruros de uranio (efectuada por E. T. Booth, H. C. Paton y C. D. Slade) dió resultados correspondientes a $\epsilon = 0{,}0014$. Si se desea producir el 99 % de $U^{235}F_6$ puro e, se emplea una cascada en que cada etapa posee un factor de enriquecimiento total razonable y entonces aparece con evidencia que se necesitan más o menos 4.000 etapas.

CIRCULACIÓN DEL GAS EN LA CASCADA

10.8. De todo el gas que pasa a través de la pared de cada etapa dada sólo la mitad pasa a través de la barrera de la etapa sucesiva más alta, y la otra mitad es devuelta a la etapa

anterior. Así, la mayoría del material que sale desde la cascada ha sido puesta nuevamente en ciclo muchas veces. El cálculo muestra que para una instalación práctica de separación de uranio puede ser necesario hacer pasar a través de las barreras de la primera etapa 100.000 veces el volumen del gas que llega al término de la cascada (esto es si se desea producto $U^{235}F_6$). Las cifras correspondientes a las etapas más altas disminuyen rápidamente debido a la reducción de cantidad del material no deseado ($U^{238}F_6$) que es arrastrado.

EL PROBLEMA DE LA SEPARACIÓN EN GRAN ESCALA

Introducción

10.9. En la época de la reorganización general del proyecto de la bomba atómica, o sea en diciembre de 1941, la teoría de la separación de isótopos mediante difusión gaseosa era bien conocida. Por consiguiente resultaba posible definir los problemas técnicos con que se había tropezado al construir la instalación de separación en gran escala. No fueron tomadas decisiones acerca del tamaño y de la ubicación de esta instalación hasta el invierno 1942-1943, esto es, más o menos en el mismo período en que fueron adoptadas las correspondientes decisiones acerca de las instalaciones para la producción de plutonio.

EL OBJETIVO

10.10. El objetivo general de una instalación en gran escala para la difusión gaseosa era la producción diaria de un número especificado de gramos de uranio que contenga U-235 en cantidad del orden de 10 veces superior a lo que se encuentra en la misma cantidad de uranio natural. Por otra parte, parecía posible que la instalación sería bastante flexible en el funcionamiento y que podían hacerse variantes considerables en el grado de enriquecimiento y en la cantidad final producida.

EL PROCESO GASEOSO

10.11. El hexafluoruro de uranio ha sido mencionado como un gas cuyo empleo puede ser apropiado en la instalación como "proceso gaseoso"; una de sus ventajas, y no la menor, consiste en que el fluoro posee solamente un isótopo de modo que las moléculas UF_6 de cualquier isótopo del uranio dado tienen todas la misma masa. Este gas es fuertemente reactivo y en realidad es sólido a la temperatura normal y a la presión atmosférica. Por eso se emprendió en seguida el estudio de otros compuestos gaseosos del uranio. Como garantía contra el fracaso en esta investigación sobre gases alternativos, fué necesario proseguir el trabajo sobre el hexafluoruro de uranio, e idear métodos para la producción y la circulación del gas.

NÚMERO DE ETAPAS

10.12. El número de etapas requerido en la cascada principal de la instalación depende solamente del grado de enriquecimiento deseado y del grado de enriquecimiento total obtenible por etapa con la barrera empleada. Los primeros cálculos cifraron en varios millares las etapas. Se pensó también en cascadas "para extraer residuos" de varios centenares de etapas de acuerdo con la cantidad de U-235 no separado que podía económicamente recobrarse.

SUPERFICIE DE LAS BARRERAS

10.13. Vimos que la cantidad total de gas que debe difundirse a través de las barreras es muy grande comparado con el volumen del producto final. La velocidad con que el gas se difunde a través de la unidad de superficie depende de la diferencia de presión de los dos lados de la barrera y de su porosidad. Aun considerando que de un lado la presión sea igual a la atmosférica y que del otro lado sea cero y admitiendo que el factor debido a la porosidad sea muy favorable, los cálculos muestran que se necesitan muchas hectáreas de barrera en una instalación en gran escala.

PROYECTOS DE BARRERAS

10.14. El libre camino medio de una molécula, a la presión atmosférica, es del orden de un diezmilésimo de milímetro o sea de un décimo de micrón. Para asegurar un verdadero flujo de gas "por difusión", el diámetro de una miriada de agujeritos en la barrera debe ser inferior a un décimo del camino libre medio. Esto significa que el material de la barrera no debe poseer agujeros que sean apreciablemente mayores de 0,01 micrón (4×10^{-7} pulgada pero en cambio debe poseer billones de agujeritos de este tamaño o menores. Estos agujeritos no deben ser más anchos o taparse por efecto de la corrosión o del polvo originado por la corrosión producida en algún lugar del sistema. La barrera debe poder soportar una presión de una atmósfera. Deben poderse manufacturar grandes cantidades de calidad uniforme. A partir de enero de 1942 fueron ensayadas muchas clases de barreras, en pequeña escala, para conocer su porosidad y su factor de separación. Algunas parecieron muy promisorias, pero ninguna fué adecuadamente probada para saber si serviría en una instalación en gran escala.

BOMBAS Y ENERGÍA NECESARIAS

10.15. En cada etapa más o menos la mitad del material que entra pasa, a través de la barrera, a la etapa superior sucesiva, mientras la otra mitad vuelve atrás a la próxima etapa más baja. La mitad difundida se halla a presión más baja y debe ser bombeada a presión más elevada antes de alimentar la etapa sucesiva. También la porción que no ha sido difundida emerge a una presión más baja de aquella a que entró y no puede ser devuelta a la etapa anterior sin ser bombeada. Así que la cantidad total de gas por etapa (constituída por el doble de lo que fluye a través de la barrera) tiene que circular forzosamente mediante bombas.

10.16. Como el flujo del gas a través de una etapa varía mucho según la posición que ocupa la etapa en la cascada, también las bombas varían mucho en tamaño y en número

de etapa a etapa. El tipo y la capacidad de la bomba necesaria para una etapa dada dependen no sólo del peso del gas a desplazarse sino de la presión que es necesario alcanzar. Los cálculos de la época se efectuaban para obtener una presión en la entrada de una atmósfera y una contrapresión (del lado de la barrera donde hay presión baja) de un décimo de atmósfera. Se estimó que se habrían necesitado millares de bombas y de kilowatts para hacerlas marchar. Como a un sistema de bombeo de gases está inevitablemente asociado un sistema de calefacción, es evidente que es necesario proveer un sistema amplio de refrigeración. A comienzos de 1942, una buena parte del trabajo preliminar sobre bombas había sido ya desarrollado. Las bombas centrífugas: parecían tentadoras a pesar del problema de cerrar sus conductos. Sin embargo los experimentos sucesivos fueron efectuados mediante bombas de varios tipos completamente cerradas.

PÉRDIDAS Y CORROSIÓN

10.17. Resultaba claro que todo el sistema de circulación, que comprendía bombas, barreras, cañería y válvulas tenía que ser a prueba de vacío. De ser necesario algún lubricante o grasa de vacío, éstos no debían reaccionar con el gas que circulaba puesto que una corrosión llevaría no sólo a tapar las barreras y ocasionar fallas mecánicas sino también a la absorción (o sea virtual desaparición) del uranio que ya había sido parcialmente enriquecido.

CASCADA PRACTICA Y CASCADA IDEAL

10.18. En una cascada ideal los requisitos de bombeo varían de una etapa a otra. En la práctica no es económico proveer un tipo de bomba distinta para cada etapa. Es por lo tanto necesario determinar el alejamiento de una cascada ideal (por el número mínimo de bombas diferentes) más conveniente desde el punto de vista de la economía del proyecto, reparaciones, etc. Soluciones de compromiso son empleadas también para las demás partes de la cascada.

TIEMPO DE CIRCULACIÓN Y DE ARRANQUE

10.19. Cuando la instalación arranca por vez primera se la debe dejar marchar por algún tiempo hasta que se haya logrado una separación suficiente de manera que cada etapa contenga gas de enriquecimiento normal. Sólo después que esta estabilización ha sido lograda es deseable retirar de la última etapa una parte del producto. La cantidad de material comprendida (el circulante) y el tiempo requerido (tiempo de arranque) son lo bastante grandes como para constituir dos problemas de consideración.

RENDIMIENTO

10.20. Era evidente que sólo había que tener en cuenta tres tipos de pérdidas de material en una instalación; éstas eran: pérdidas por fallas, pérdidas por corrosión (esto es, debidas a combinaciones químicas y depósito) y pérdidas por inconvenientes en la instalación. Se esperaba que las fallas podrían considerarse pequeñas y que (después de un período inicial de funcionamiento) las pérdidas por corrosión serían reducidas. El porcentaje de material perdido por desperdicio depende del número de etapas de extracción.

PROYECTO DETALLADO

10.21. Todavía quedaba por resolver problemas como qué material tenía que usarse en las barreras (si en tubos o en hojas, en grandes unidades o en pequeñas) como el efectuar la mezcla y los controles e instrumentos que resultarían necesarios. Había pocas razones de pensar que no se pudiera resolverlos pero no cabía la menor duda que se habría necesitado un estudio teórico y experimental.

SÍNTESIS DEL PROBLEMA

10.22. Desde 1942 la teoría de la separación del isótopo por medio de difusión gaseosa había sido bien desarrollada y resultó claro que se necesitaría una instalación muy grande.

Las partidas de equipo más importantes en esta instalación eran las bombas y las barreras de difusión. Ni las barreras ni las bombas de que se disponía en la época demostraron ser adecuadas de manera general. Por consiguiente, un ulterior desarrollo de bombas y barreras era particularmente urgente. Quedaban además otros problemas técnicos por solucionar, tales como los resultantes de la corrosión, del cierre a prueba de vacío y del instrumental.

ORGANIZACIÓN

10.23. Como recordamos al comienzo de este capítulo, el trabajo sobre difusión fué empezado por J. R. Dunning y proseguido por el O. S. R. D., en la Universidad de Columbia, hasta el 1º de mayo de 1943, fecha en que pasó al distrito de Manhattan. En el verano de 1943 las dificultades encontradas para solucionar ciertas fases del proyecto originaron un aumento considerable de trabajo para todo el grupo de química. H. C. Urey, entonces director del trabajo, nombró a H. S. Taylor, de Princeton, codirector y agregó al grupo directivo a E. Mack, hijo, del estado de Ohio, G. M. Murphy, de Yale, y P. H. Emmett, de la Johns Hopkins. La mayor parte del trabajo fué sacado de los laboratorios de la Columbia y llevado a un edificio muy grande cercano. A los químicos de Princeton, que habían sido encargados de estudiar el agua pesada, se les asignaron, además, problemas de investigación sobre barreras. En el comienzo de 1944, L. M. Currie, de la National Carbon Co., fué también agregado como director para ayudar a Urey en sus enlaces y en el trabajo administrativo.

10.24. Como ya dijimos, fué designada al comienzo de 1942 la M. W. Kellogg Co. para planear una instalación en gran escala. Con este fin la Kellogg creó una compañía subsidiaria, llamada Kellex Co. con P. C. Leith como director ejecutivo y técnico, A. L. Baker, encargado del proyecto y J. H. Arnold como director de la investigación y desarrollo. La nueva entidad subsidiaria continuó la investigación y el desarrollo en los laboratorios de Jersey City y en los laboratorios de que hablamos en el párrafo anterior; desarrolló el proceso y los

planes de ingeniería; procuró los materiales para una instalación en gran escala e inspeccionó su construcción. La instalación fué realizada por la J. A. Jones Construction Co. Inc., de Charlotte, de la Carolina del Norte.

10.24. A. La Kellex Co., al contrario de las firmas industriales convencionales, era una cooperativa de hombres de ciencia, ingenieros y administradores reclutados de todas las ramas esenciales de la industria y reunidos con el objeto específico de efectuar este solo trabajo. El servicio era voluntario; personas eminentes del ambiente industrial abandonaron espontáneamente sus deberes y responsabilidades normales para dedicar todo su tiempo a las actividades en la Kellex. Tan pronto como sus respectivas tareas terminaban, estas personas volvían a sus anteriores ocupaciones en la industria.

10.25. En enero de 1943 la Cardib y la Carbon Chemical Co. fueron elegidas para confiarles la instalación completa. Sus ingenieros muy pronto empezaron a desempeñar un papel muy importante no sólo en el proyecto y construcción sino también en el trabajo de investigación.

INVESTIGACIÓN, DESARROLLO, CONSTRUCCIÓN Y PRODUCCIÓN DESDE 1942 A 1945

Producción de barreras

10.26. Aun antes de 1942, se habían producido barreras consideradas satisfactorias. Sin embargo, las barreras primeramente construídas por E. T. Booth, H. C. Paxton y C. B. Slade no fueron nunca empleadas en gran escala debido a su baja resistencia mecánica y a la corrosión. En 1942, bajo la dirección general de Booth y F. G. Slack y con la colaboración de varios científicos, inclusive F. C. Nix, de los laboratorios de la Bell Telephone, fueron producidos distintos tipos de barreras. Por primera vez una barrera construída por E. O. Norris y E. Adler fué considerada suficientemente satisfactoria como para adoptarla en una instalación. Otras barreras fueron hechas combinando las ideas de muchos hombres de los laboratorios de Columbia (desde entonces llamados laboratorios S A M) de Kellex, de los laboratorios de la Bell Tele-

phone, de la Bakelite Corp., de la Houdaille-Hershey Corp. y de otros. Las primeras muestras del tipo de barreras elegido para un empleo general en la instalación fueron preparadas por C. A. Johnson, de la Kellex y la barrera fué perfeccionada bajo la dirección general de H. S. Taylor. Una modificación de esta barrera realizada por los Laboratorios S A M representó un marcado progreso en la calidad y está siendo empleada en un gran número de etapas de la instalación. A partir de 1945 el problema no consistía sólo en encontrar exclusivamente un mínimo de especificaciones sino en hallar mejoras que permitieran una mayor velocidad de producción y una mayor economía de la operación.

10.27. En su conjunto la historia del desarrollo de la barrera recuerda el problema del "revestimiento" en el proyecto del plutonio. En cada caso los métodos fueron probados y vueltos a probar ampliamente y soluciones satisfactorias o casi satisfactorias fueron repetidamente anunciadas; sin embargo, en cada caso una solución realmente satisfactoria no fué hallada hasta el último momento y entonces resultó ser muchísimo mejor de lo que se había esperado.

BOMBAS Y CIERRES

10.28. Al comienzo el trabajo sobre bombas aspirantes y compresoras bajo la dirección de H. A. Boorse, de la Universidad de Columbia. Cuando la Kellex intervino en los trabajos, en 1942, sus ingenieros, sobre todo G. W. Watts, J. S. Swearingen y O. C. Brewster, tomaron posiciones directivas en la construcción de las bombas y de los cierres. Hay que recordar que estas bombas tienen que trabajar bajo una presión reducida, no tienen que perder, no tienen que corroerse, y deben poseer un volumen tan reducido como sea posible. Muchos distintos tipos de compresores centrífugos y de bombas que aspiran y comprimen alternativamente fueron ensayados. En unas de las bombas para las etapas superiores el compresor se hacía pasar a través de un acoplamiento cerrado mediante un ingenioso y original tipo de cierre. Otro tipo de bomba está completamente encerrada mientras el émbolo por centrifugación y el rotor se hace girar desde afuera por indución.

DESARROLLOS VARIOS

10.29. Como en el problema del plutonio, también había que investigar muchos otros problemas de corrosión, etc. Nuevos refrigerantes y lubricantes fueron obtenidos por A. L. Henne y sus colegas, por H. G. Cady, por W. T. Miller y sus colaboradores, por E. T. McBee y sus colegas y por científicos de varias empresas, como la Hooker Electrochemical Co., la du Pont Co. y la Harshaw Chemical Co. La investigación, el desarrollo y los requisitos de instalación para estos materiales y otros productos químicos especiales fueron coordinados por R. Rosen, primero bajo la U S R D y luego por la Kellex. Fueron llevados a cabo métodos para el tratamiento preventivo de superficies contra la corrosión. Entre los varios instrumentos escogidos o adaptados para la aplicación del proyecto, hay que mencionar en particular modo el espectrógrafo de masa. La empresa tuvo suerte en obtener el apoyo de A. O. Nier, de la Universidad de Minnesota y más tarde de Kellex, cuyos métodos de espectrógrafo de masa de los análisis de isótopos estaban lo suficientemente adelantados como para dar gran valor al plan, como en el caso del análisis de muestras de uranio enriquecido. Espectrógrafos de masa se empleaban también para el control previo de partes, para pérdidas de vacío y para detectar las impurezas en los procesos gaseosos en la instalación.

INSTALACIONES EXPERIMENTALES

10.30. Hablando con exactitud no había instalación experimental. Eso significa que no existía un sistema de separación en pequeña escala que empleara los mismos tipos de compresores, barreras, montajes de barreras, refrigeración, etc., que fueran instalados en la planta principal. Tal sistema no podía ser implantado porque los varios elementos de la instalación no eran aprovechables con anterioridad a la construcción de la instalación misma. Para emprender la construcción de la instalación en gran escala bajo estas circunstancias se requería previsión y osadía.

10.31. Existía, sin embargo, una serie entera de las llamadas instalaciones experimentales que servían para el ensayo de varios compuestos o grupos de compuestos de la instalación final. La instalación experimental Nº 1 era una instalación de 12 etapas donde se empleaba un tipo de barrera más o menos como la empleada en la instalación en gran escala, pero el material de la barrera no era fabricado en la forma específica para la instalación y las bombas empleadas eran a pistón selladas con aneroides y no bombas centrífugas. El trabajo en esta instalación en el año 1943 ensayaba no solamente las barreras y el sistema general de separación sino que también proporcionaba informes sobre las válvulas de control, los calibradores de presión, la cañería, etc. La instalación experimental Nº 2, reproducción más grande de la Nº 1, pero de sólo 6 etapas, se empleó al final de 1943 y a principios de 1944, principalmente como unidad de ensayo para los instrumentos. La instalación experimental Nº 3a, que empleaba compresores centrífugos y pequeños difusores, estaba también ideada principalmente para ensayo de instrumentos. La instalación experimental Nº 3b era realmente una instalación experimental para una sección especial de instalación en plena escala. Instalaciones experimentales que empleaban el equipo de gran escala fueron emplazadas en el sitio de la instalación y comprobaron las pérdidas de vacío, la resistencia a la corrosión y la eficiencia general del equipo.

AUTORIZACIÓN DE INSTALACIÓN

10.32. En diciembre de 1942, la Kellogg Co. fué autorizada para emprender el proyecto de instalación preliminar y en enero de 1943 fué autorizada la construcción de una instalación.

LA UBICACIÓN

10.33. Como decimos en un capítulo precedente, había sido originalmente elegido un lugar en el Valle de Tennessee para toda la instalación del distrito de Manhattan, pero la instalación del plutonio fué construída en otro lugar. Quedaba la instalación experimental de plutonio ya descrita, la instalación

por difusión gaseosa, la instalación por separación electromagnética (véase capítulo XI), y por último la instalación por difusión térmica que fueron construídas en el Valle de Tennessee del lado de Clinton, que ahora se conoce como "Clinton Engineer Works".

10.34. Este lugar fué examinado por los coroneles Marshall y Nichols y representantes de la Stone and Webster Engineering Co. en julio de 1942 y su adquisición fué recomendada. Esta recomendación fué comunicada en una reunión de julio 1942 al comité ejecutivo de la O S R D S-1. La aprobación final fué dada por el mayor general L. R. Groves después de una inspección personal a los 112 kilómetros cuadrados. En setiembre de 1942 fueron dados los primeros pasos para adquirir el trecho que se halla sobre el río Clinch a más o menos 48 kilómetros de Knoxville, Tennessee, que probablemente resultó mucho mayor que 112 kilómetros cuadrados. La instalación experimental (planta piloto) está situada en un valle, la instalación para la separación electromagnética en otro valle cercano y en un tercero se halla la instalación para la separación por difusión.

10.35. Aun siendo la instalación y el lugar de desarrollo en Hanford muy impresionantes, todo se halla bajo la dirección de una sola compañía y todo forma parte de una sola operación, así que desde cierto punto de vista es menos interesante que Clinton, que presenta una gran multiplicidad de actividades. La descripción del lugar de Clinton con su gran florecer de nuevas instalaciones, sus nuevos barrios residenciales, sus nuevos teatros, su nuevo sistema de escuela, grandes lodazales, nubes de tierra y la actividad general febril queda fuera del objeto de este informe.

FECHAS DEL COMIENZO DE LA CONSTRUCCIÓN

10.36. La construcción de la central de energía a vapor para la instalación por difusión empezó el 1º de junio de 1943. Es una de las mayores centrales de este tipo que jamás se hayan construído. La construcción de otros edificios más grandes e instalaciones empezó entre el 29 de agosto de 1943 y el 10 de septiembre de 1943.

FUNCIONAMIENTO

10.37. A diferencia de la de Hanford, la instalación por difusión consiste en unidades más o menos independientes que fueron puestas en marcha sección por sección a medida que los progresos en la construcción y en el control así lo permitían. No se produjo así una fecha dramática de inauguración ni algún incidente destacado para marcarla. La instalación se encontraba funcionando con éxito antes del verano de 1945.

10.38. Para quienes trabajaban en la difusión gaseosa fué un largo tirón éste desde 1940 a 1945 sin alicientes a mitad de camino, como fué la primera pila con reacción en cadena en Chicago. Tal vez más que todo otro grupo en el proyecto los que trabajaron en la difusión gaseosa merecen estima por el valor y la constancia como también por la habilidad científica y técnica. Por razones de seguridad no podemos referir cómo ellos solucionaron sus problemas; en muchos casos hasta encontraron varias soluciones, como en la garantía contra fallas en la instalación. Fué una adquisición notable. En estos cinco años hubo períodos de descorazonamiento y de pesimismo. Están ampliamente olvidados ahora que la instalación no sólo funciona, sino que funciona bien, con seguridad y se desempeña mejor de lo que se había anticipado.

RESUMEN

10.39. El trabajo en la Universidad de Columbia sobre separación de isótopos por difusión gaseosa empezó en 1940 y a fines de 1942 habían sido bien definidos los problemas de la separación en larga escala del uranio empleando este método. Siendo la cantidad separada que podía lograrse mediante una sola etapa demasiado pequeña, eran necesarias millares de etapas sucesivas. Se encontró que el mejor método de conectar las muchas etapas requería reponer en el ciclo muchas veces el gas, de manera que cuanto más material pasara a través de las barreras de las etapas más bajas, tanto más producto aparecería en la etapa más alta.

10.40. Los problemas principales consistieron en la cons-

trucción de barreras y bombas satisfactorias. Eran necesarias millares de bombas y hectáreas de barreras. El gas más obvio a emplearse era el hexafluoruro de uranio para cuya producción y manejo las dificultades eran tan grandes que se empezaron investigaciones para buscar otra salida. Debido a que una gran parte de la separación tenía que cumplirse a baja presión, surgieron problemas de técnica de vacío en una escala jamás igualada hasta entonces. Fueron solucionados muchos problemas de instrumental y control; se hizo un empleo muy extenso de varios tipos de espectrógrafos de masa.

10.41. La investigación fué realizada principalmente en Columbia bajo la dirección de Dunning y Urey. En 1942 fué elegida la M. W. Kellogg Co. para desarrollar el proceso y el equipo y para proyectar la instalación y realizarla fué creada la Kellex Co. La instalación fué construída por la J. A. Jones Construction Co. La Carbid and Carbon Chemical Co. fué encargada de hacerla funcionar.

10.42. Una barrera muy satisfactoria fué obtenida, pero la elección final del tipo de barrera no se hizo hasta que la construcción de la instalación no se encontró en marcha en Clinton Engineer Works en Tennessee. Fueron construídos dos tipos de compresores por centrifugación hasta que resultaron adecuados a los requisitos de bombeo. La instalación comenzó a funcionar con éxito antes del verano de 1945.

CAPÍTULO XI

SEPARACIÓN ELECTROMAGNÉTICA DE LOS ISÓTOPOS DEL URANIO

INTRODUCCIÓN

11.1. En el capítulo IV decimos que la posibilidad de separar en gran escala los isótopos del uranio por medio de un sistema electromagnético fué sugerida a fines de 1941 por E. O. Lawrence, de la Universidad de California y H. D. Smyth, de la Universidad de Princeton. En el capítulo IX hemos descripto un método de separación electromagnética y hemos examinado las tres limitaciones de este método: la dificultad de producir iones, la limitada fracción de iones que se puede emplear y los efectos de la carga espacial.

11.2. A fines de diciembre de 1941, cuando fué efectuada la reorganización de todo el proyecto del uranio, Lawrence ya había obtenido algunas muestras de isótopos de uranio separado y en la reorganización se le encargó oficialmente la preparación de ulteriores muestras y la ejecución de varias mediciones físicas con ellas vinculadas. Sin embargo, exactamente como el Laboratorio Metalúrgico muy pronto desplazó sus objetivos desde la física de la reacción en cadena a la producción en larga escala del plutonio, así el objetivo de la sección de Lawrence inmediatamente se desplazó hacia la separación en gran escala de los isótopos de uranio por métodos electromagnéticos. Este cambio fué provocado por el éxito de los experi-

mentos iniciales en California y por el desarrollo en California y en Princeton de ideas sobre otros métodos posibles. De los muchos esquemas electromagnéticos propuestos, muy pronto se consideraron tres como los más promisorios: el "calutrón" separador por masa, el separador por tipo magnetrón, más tarde desarrolldado como "centrífuga iónica" y el "isotrón" método de recoger un haz de iones. Los dos primeros fueron estudiados en California y el tercero en Princeton. Después de los primeros meses el mayor esfuerzo fué dedicado al calutrón, pero siguió el trabajo sobre la centrífuga iónica en California durante el verano de 1942 y luego fué continuado por J. Slepian en los laboratorios Westinghouse en Pittsburgo en pequeña escala en el invierno de 1942-1945. El trabajo sobre el isotrón fué seguido en Princeton hasta febrero de 1943, cuando la mayoría del grupo pasó a efectuar otro trabajo. La mayor parte de este capítulo será dedicada al calutrón, puesto que es este método el que dió resultado para producir en gran escala el U-235. Daremos también una breve descripción de la instalación por difusión térmica construída para proveer material enriquecido para alimentar la instalación electromagnética.

11.3. Los requisitos de seguridad hacen imposible aquí —como en otras partes del proyecto— presentar muchos de los más interesantes detalles técnicos. La importancia del desarrollo es considerablemente mayor de la indicada por el espacio que aquí le dedicamos.

SEPARADORES ELECTROMAGNÉTICOS DE MASA

Trabajo preliminar

11.4. El espectrógrafo de masa de A. O. Nier fué puesto en función en un comienzo para medir la abundancia relativa de los isótopos y no para separar grandes muestras. Nier, empleando vapor proveniente del bromuro de uranio, había preparado varias pequeñas muestras de isótopos separados de uranio, pero su velocidad de producción era por cierto muy baja siendo su corriente iónica inferior a un micro ampère. (Un espectrógrafo de masa en que a través de los campos

separadores pasa una corriente de un micro ampère de iones de uranio normal, recoge en los colectores más o menos un microgramo de U-235 en 16 horas). La gran necesidad de muestras de U-235 enriquecido para estudios nucleadores fué puesta en evidencia en seguida por Lawrence, que decidió examinar lo que se podía hacer con la ayuda del magneto de 37 pulgadas (ciclotrón) en Berkeley. Para las etapas iniciales de este trabajo se obtuvo un crédito de la Corporación de Investigación de Nueva York que fué más tarde pagado. El 1º de enero de 1942, la financiación completa provino del O S R D por intermedio del Comité S-1. Más tarde, como en otras partes del proyecto del uranio, los contratos fueron proseguidos por el Departamento Manhattan.

11.5. En Berkeley, después de algunas semanas de planificación, se deshizo el ciclotrón de 37 pulgadas el 24 de noviembre de 1941, y su magneto se empleó para producir el campo magnético requerido para lo que luego se llamó un "calutrón" (el nombre representa una contracción de "Ciclotrón de la Universidad de California"). Se estableció una fuente de iones, que consiste de un rayo electrónico que atraviesa el vapor de una sal de uranio, correspondiente a la fuente de iones que aparece en el dibujo del capítulo IX, página . Los iones eran luego acelerados hacia la ranura s_2 a través de la cual llegaban a la región de separación donde el campo magnético hacía doblar sus caminos en semicírculos que terminaban en la ranura del colector. Para el 1º de diciembre de 1941 se obtuvieron rayos de iones moleculares de los gases residuales y poco después el rayo que consistía de iones de uranio de una sola carga (U_+) llegó a tener una fuerza considerable. Se halló que una notable proporción de los iones que se alejaban de la fuente eran iones U_+. Con el fin de ensayar el conjunto de distintas muestras, se colocó un colector con dos receptáculos, ambos separados por una distancia apropiada de los números de masa 235 y 238. Dos pequeños ensayos de recolección rayos U_+ de baja potencia se hicieron en el mes de diciembre, pero luego el análisis de las muestras mostró sólo un pequeño factor de separación. Más o menos a mediados del mes de enero de 1942, se hizo un ensayo con una potencia de rayo razonable y un flujo total apreciable que mostró un factor de

separación muy mejorado. A principios del mes de febrero de 1942 se obtuvieron rayos de potencia mucho más grande, y Lawrence informó que se podían obtener con tales rayos buenos factores de separación. Al comienzo de marzo de 1942 la corriente de iones había sido elevada más todavía. Estos resultados tendían a justificar las esperanzas de Lawrence, puesto que la carga espacial podía ser neutralizada por la ionización del gas residual en la cámara magnética.

COMIENZO DE UN GRAN PROGRAMA

11.6. En esa época resultaba claro que el calutrón era potencialmente capaz de efectuar separaciones en mucho mayor escala de la que se había obtenido antes por un método electromagnético. Se evidenció la utilidad de explotar el campo entero de separación electromagnética. Con este fin Lawrence movilizó su grupo del Laboratorio de Radiación de la Universidad de California, en Berkeley e invitó a otros a secundarlos. Entre los componentes del grupo inicial en Berkeley estaban D. Cooksey, P. C. Aebersold, W. M. Brobeck, F. A. Jenkins, K. R. MacKenzie, W. B. Reynolds, D. H. Sloan, F. Oppenheimer, J. G. Backus, B. Peters, A. C. Helmholz, T. Finkelstein, y W. E. Parkins, hijo. Lawrence llamó algunos de sus primeros alumnos, incluyendo a R. L. Thornton, J. H. Richardson y otros. Entre los que trabajaron en Berkeley durante varios períodos se hallaban L. P. Smith de la Cornell, E. U. Condon y J. Slepian, de la Westinghouse e I. Langmuir y K. H. Kingdon, de la General Electric. Durante este primer período J. R. Oppenheimer estaba constantemente en Berkeley y contribuyó en algunas ideas importantes. A fines de 1943 el grupo fué fortalecido con la llegada de un cierto número de físicos ingleses bajo la dirección de M. L. Oliphant, de la Universidad de Birmingham.

11.7. Al principio se tomaron en consideración un gran número de métodos distintos y se efectuaron muchos experimentos de sondeo. Sin embargo, el esfuerzo principal se encauzó pronto hacia el perfeccionamiento del calutrón, siendo el objetivo un alto factor de separación y una gran corriente en el rayo de iones positivos.

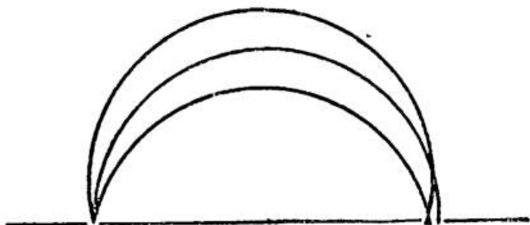
OBJETIVOS INMEDIATOS

11.8. De las tres limitaciones aparentes descritas en el primer párrafo —dificultad en la producción de iones, la fracción limitada de iones empleada y los efectos de la carga espacial— solamente la última había cedido a la tentativa preliminar. Aparentemente la carga espacial en la cercanía del rayo de iones positivos podía ser anulada en una gran parte. Quedaban como objetivos inmediatos una fuente más productiva de iones y una gran utilización más completa de éstos.

11.9. Los factores que regulan la eficacia de una fuente de iones son muchos. Ello implica el proyecto de una fuente adecuada y el método de extracción de iones de la fuente. Los problemas que se tienen que solucionar no pueden ser formulados simplemente y han de ser abordados por métodos que son muy empíricos. Aun si las restricciones de seguridad permitieran una exposición de las innumerables formas de la fuente de iones y del sistema de aceleración que se probaron, tal descripción sería demasiado técnica para ser presentada aquí.

11.10. Volviendo al problema de hacer más completa la utilización de los iones, tenemos que considerar con cierto detalle el principio del funcionamiento del calutrón. El calútrón depende del hecho que los iones de una sola carga moviéndose en un campo magnético uniforme perpendicular a su sentido de movimiento siguen caminos circulares de radio proporcional a su cantidad de movimiento. Considerando ahora un solo isótopo, es claro que los iones que pasan a través de dos ranuras (y así pasan dentro de la gran región vacía en la cual está presente el campo magnético) no siguen inicialmente una sola dirección, sino que tienen muchas direcciones iniciales situadas dentro de un pequeño ángulo, cuyo tamaño depende del ancho de las ranuras. Sin embargo, afortunadamente, puesto que todos los iones del isótopo de que se trata siguen caminos curvados del *mismo* diámetro, los iones que salen afuera en direcciones escasamente distintas tienden a encon-

trarse de nuevo —o casi a encontrarse de nuevo— después de haber completado un semicírculo. Por supuesto, es en esta posición de reconvergencia donde se coloca el colector. Naturalmente, los iones de otro isótopo (por ejemplo, los iones de masa 238, en lugar que los de 235) se conducen de la misma manera, con excepción de los que siguen círculos de diámetro ligeramente distinto. Se tomaron en los colectores muestras de los dos isótopos en las dos posiciones distintas de reconvergencia. Ahora la utilización de una gran fracción de los iones primeramente producidos puede efectuarse con bastante prontitud ensanchando las dos ranuras mencionadas. Pero no es fácil ensanchar las ranuras en una gran extensión sin sacrificar la agudeza de los focos en las posiciones de reconvergencia. Verdaderamente se puede efectuar solamente con el empleo de variaciones de extensión cuidadosamente proporcionadas en la fuerza del campo magnético. Afortunadamente tales variaciones fueron llevadas a cabo con éxito.



11.11. Otro problema, no tan inmediato pero con todo reconocido como de importancia para cualquier instalación de producción, era el de un empleo más eficiente del campo magnético. Puesto que los grandes electromagnetes eran costosos tanto para construirlos como para hacerlos funcionar, era natural la consideración del empleo del mismo campo magnético. Puesto que los grandes electromagnetos eran cosmental de un proyecto tan económico llegó a ser la más importante tarea del laboratorio.

EL MAGNETO GIGANTE

11.12. Aunque la escala de separación alcanzada en marzo de 1942 fuera mucho más grande que cualquiera hecha ante-riormente con un separador de masa electromagnético, se hallaba todavía muy lejos de lo que requería la producción de cantidades de material de significación militar. Los problemas que habían sido bosquejados no solamente se tenían que solucionar, sino que tenían que solucionarse en gran escala. El magneto de 37 pulgadas del ciclotrón que se había empleado era todavía capaz de proporcionar útil información, pero era deseable un equipo más grande. Afortunadamente un magneto mucho más grande, destinado a un ciclotrón gigante, se hallaba en construcción en Berkeley. Este magneto, con un diámetro polar de 184 pulgadas y una abertura polar de 72 pugadas, iba a ser el más grande existente. Su construcción había sido interrumpida por la guerra, pero se hallaba lo suficientemente adelantado como para poder ser terminado dentro de pocos meses si se lo otorgaba la prioridad adecuada. Aparte del magneto mismo, el edificio unido, los laboratorios, las fábricas, etc., eran casi perfectas para el desarrollo del calutrón. No hay necesidad de decir que el trabajo del magneto gigante fué reanudado y para los últimos días de mayo de 1942 estaba listo para el uso (*).

DESARROLLO HASTA SETIEMBRE DE 1942

11.13. El primer experimento que empleaba el magneto de 37 pulgadas ha sido descripto en un párrafo precedente. Los desarrollos ulteriores marcharon principalmente siguiendo estas directivas: construcción e instalación de una unidad de separación experimental para el magneto de 37 pulgadas, y

(*) La construcción del ciclotrón gigante fué emprendida con fondos privados generosamente proporcionados por la Fundación Rockefeller, aumentados por donaciones de la "Research Corporation", de la Fundación John y Mary Markel y de la Universidad de California. Para llevar adelante la construcción lo más pronto posible se requirieron horas extraordinarias de trabajo con un gasto suplementario. Para cubrir estos gastos la Rockefeller Foundation proporcionó nuevos fondos especiales.

proyecto y construcción de unidades de separación experimental para el gran magneto.

11.14. Además del aumento gradual en la intensidad del rayo iónico y del factor de separación que resultaba de una serie de desarrollos en la fuente de los iones y en el sistema de aceleración, una mejoría en la utilización de iones fué lograda durante el verano de 1942 con el empleo del magneto gigante. Más adelante fué posible mantener más de un rayo iónico en la misma región de separación magnética. Sin embargo, experimentos sobre este último problema presentaron algunas dificultades y pareció que podían existir limitaciones en el número de las fuentes y de los receptores que hubieran podido colocarse en una misma unidad como también en la corriente que se hubiera podido emplear en cada rayo sin malgastar la separación.

11.15. Fué evidente que muchas unidades de separación habrían sido necesarias para proporcionar una cantidad de producción de significación militar. Por eso se tomaron en consideración varios sistemas para combinar grupos de unidades mediante arreglos económicos. Se llevó a cabo un proyecto que fué más tarde empleado en las instalaciones de producción y que dió resultados satisfactorios.

VENTAJAS DEL SISTEMA ELECTROMAGNÉTICO

11.16. En el mes de setiembre de 1942, ambos métodos de difusión gaseosa y de centrifugación del uranio habían sido estudiados intensivamente y durante un período más largo que en el caso del método electromagnético. Estos dos métodos —de difusión gaseosa y de centrifugación— parecían factibles para la producción en gran escala del U-235, pero ambos requerían centenares de tapas para lograr la separación en gran escala. Ninguno de los dos había producido entonces cantidades apreciables de U-235 separado. No se había dado todavía principio a una instalación en gran escala para la producción de plutonio, y no habían sido todavía comprobadas las posibilidades de la reacción en cadena autosostenida que tenía que producir plutonio. Pero en el caso del método electromagnético después de la afortunada separación de can-

tidades de milígramos se tenía la seguridad de su factibilidad científica. Si una unidad puede separar 10 mg por día, 100,000.000 unidades pueden separar una tonelada diaria. Las cuestiones consistían en el costo y en el tiempo. Cada unidad tenía que ser un complicado artefacto electromagnético que requería alto vacío, altos voltajes, e intensos campos magnéticos; y se necesitaba una gran cantidad de trabajo de investigación y desarrollo antes que se pudieran construir unidades completas en gran escala. Probablemente se habrían necesitado muchos operadores prácticos. En conjunto pareció en aquel tiempo muy costoso, pero pareció también un método seguro y relativamente rápido. Por otra parte, la pequeñez de las unidades tenía la ventaja de que se podía continuar su desarrollo, se podían hacer modificaciones en el curso de la construcción o, dentro de ciertos límites, después de la construcción y se podía siempre aumentar la capacidad con la construcción de nuevas unidades.

PLAN DE ACCIÓN

11.17. Sobre la base de una información científica y de ingeniería más bien incompleta relativa a todos los métodos y teniendo en cuenta presupuestos de costo igualmente dudosos habían de tomarse decisiones sobre los siguientes asuntos: (1) si construir una instalación electromagnética; (2) cuán grande tendría que ser tal instalación; (3) en qué punto del desarrollo se debía interrumpir el proyecto.

CONSENTIMIENTO DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA INSTALACIÓN

11.18. De acuerdo con la solidez de los resultados obtenidos en los experimentos realizados en Berkeley en el verano de 1942, el Comité Ejecutivo S-1 en una reunión en Berkeley el 13-14 de setiembre de 1942 recomendó atender a los pedidos del ejército para una instalación de separación que tenía que construirse en el lugar del valle de Tennessee (Trabajos de Ingeniería de Clinton). Se recomendó tomar el acuerdo de que los pedidos para esta instalación pudieran ser anulados

sobre la base de ulteriores informes. Fué recomendado que se construyera una instalación experimental en el valle de Tennessee lo más pronto posible. (Sin embargo, esta recomendación fué retirada y una tal planta nunca fué construída). La construcción de una instalación de producción fué autorizada por el general Groves el 5 de noviembre de 1942 en la inteligencia de que el proyecto para las primeras unidades tenía que concretarse inmediatamente.

ORGANIZACIÓN PARA EL PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN

11.19. Cuando describimos la producción de plutonio, señalamos la división de responsabilidades entre el Proyecto Mètalúrgico y la Compañía du Pont. La instalación para la separación electromagnética fué planeada y construída mediante un esquema de organización un poco distinto. La responsabilidad fué subdividida entre los seis mayores grupos. El laboratorio de radiaciones de la Universidad de California se encargaba de la investigación y el desarrollo, la Compañía Westinghouse Electric and Manufacturing de la ejecución de las partes mecánicas, como fuentes, receptores, bombas, tanques, etc.; la Compañía Allis-Chalmer de los imanes; la Compañía Stone and Webster Engineering de la construcción y el montaje; la Compañía Tennessee Eastman del funcionamiento. Todas las seis industrias interesadas mantuvieron grupos de ingenieros en Berkeley así que pudo lograrse un sistema de múltiples conferencias de intercambio sin formalidades. De esta manera la mayor parte del proyecto fué hecha en colaboración por un solo grupo mientras los detalles podían ser confiados a las oficinas de centrales de las varias compañías.

BASE DE LAS DECISIONES TÉCNICAS

11.20. Aunque parezca raro, mientras la teoría de una pila con reacción en cadena autosostenida es ya bastante bien conocida, la teoría de la descarga gaseosa, después de cinco años de trabajo intenso, resulta todavía incapaz de predecir el exacto comportamiento de los iones en un calutrón. La cantidad de U-235 recogida por día y la pureza del material reco-

gido dependen de muchos factores que comprenden: (1) el ancho, la distancia y la forma del colector, (2) la presión en el lugar del imán, (3) la intensidad y uniformidad del campo magnético, (4) la forma y el espacio definido por las ranuras y el sistema acelerador, (5) el potencial acelerador, (6) el tamaño y la forma de la ranura de la fuente de arco de la cual provienen los iones, (7) la corriente en el arco, (8) la posición del arco con respecto al recipiente que lo contiene, (9) la naturaleza química del vapor. Evidentemente no había tiempo para un estudio sistemático de todas las posibles combinaciones de estas variables. El desarrollo tuvo que ser ampliamente intuitivo. Se estudiaron muchas condiciones y se dió un buen número de interpretaciones parciales. Luego la experiencia acumulada por el grupo, la "intuición" del problema, tenía que ser traducida en un proyecto específico y recomendaciones.

DECISIONES TÉCNICAS REQUERIDAS

11.21. (a) *El número de etapas.* Como en todos los métodos se tuvo que llegar a una solución de compromiso entre cantidad producida y factor de separación. En el sistema electromagnético el factor de separación es mucho más elevado que en otros sistemas, de manera que el número de etapas requeridas es pequeño. Había la posibilidad de que una sola etapa pudiera ser suficiente. Estudios previos habían mostrado que las tentativas de llevar el factor de la separación a un tan alto grado que una operación en una sola etapa fuese suficiente reducía la cantidad producida a valores de una pequeñez impracticable.

11.22. (b) *Especificaciones.* Las nociones y la experiencia que habían sido adquiridas acerca de las variables tales como las recordadas antes tenían que traducirse en decisiones sobre los siguientes puntos principales antes que el proyecto pudiese empezar: (1) el tamaño de la unidad determinado por el radio de curvatura de la trayectoria del ion, el largo de la ranura de la fuente y la disposición de la fuente y de los receptores; (2) la intensidad máxima requerida del campo magnético; (3) si emplear o no una gran divergencia en el haz de iones;

(4) el número de fuentes y de receptores por unidad; (5) si la fuente debía hallarse a potencial elevado o a potencial terrestre; (6) el número de electrodos aceleradores y los máximos potenciales aplicados a ellos; (7) la energía requerida para alimentar el arco, los potenciales aceleradores, las bombas, etc.; (8) condiciones de bombeo; (9) el número de unidades por par de expansiones polares; (10) número de unidades por edificio.

UNIDADES EXPERIMENTALES EN BERKELEY

11.23. Muchos aspectos del proyecto para la primera instalación tuvieron que realizarse al final de 1942 sobre la base de los resultados obtenidos con el empleo del imán gigante de Berkeley. El proyecto de la instalación, sin embargo necesitaba unidades de un tipo algo distinto. A pesar de que no había razón para suponer que estos cambios introducirían alguna diferencia en el resultado, era evidentemente conveniente construir un prototipo en Berkeley. La construcción de esta unidad fué aprobada aproximadamente al mismo tiempo que fueron encomendadas las primeras unidades de la instalación, de manera que la experiencia derivada de ésta no modificó profundamente el proyecto; sin embargo éste fué ultimado y entró en marcha en abril de 1943, esto es, seis meses antes de la primera instalación. Por consiguiente, ésta tuvo gran valor para ensayar y adiestrarse. Más tarde un tercer imán fué construído en el edificio del imán gigante de Berkeley. En conjunto hubo seis unidades separadoras utilizables simultáneamente para experimentar o para proyectar una instalación experimental, en Berkeley. Aparte las unidades completas se hizo mucho trabajo subsidiario.

EL SEPARADOR ISOTRÓN

11.24. Como ya dijimos H. D. Smyth, de Princeton, se interesó por los métodos de separación electromagnética al final del verano de 1941. Él estaba particularmente interesado en proyectar algún método que empleara una fuente de iones extendida en lugar de una fuente prácticamente limitada a una

sola dimensión por un sistema de ranura como la empleada en el separador de masa del calutrón. Entonces fué sugerido un método para lograr la separación empleando una fuente iónica extendida, por R. R. Wilson, de Princeton. Al dispositivo resultado de las ideas de Wilson se dió deliberadamente un nombre sin sentido: "isotrón".

11.25. El isotrón es un separador de masa electromagnético que emplea una fuente extendida de iones a diferencia de las fuentes estrechas que emplean los ordinarios espetrógrafos de masa. Los iones salidos de la fuente extendida son primero acelerados por un campo eléctrico, de alta intensidad, y sucesivamente son acelerados por un campo eléctrico de baja intensidad variable con radiofrecuencia en forma de "diente". El efecto del campo eléctrico constante es el de proyectar un intenso haz de iones a través de un tubo con energía cinética constante y por consiguiente con velocidades inversamente proporcionales a la raíz cuadrada de las masas de los iones. El campo eléctrico variable, por otra parte, introduce pequeñas variaciones periódicas de velocidad en los iones y provoca la aglomeración de los iones a cierta distancia en el tubo. (El mismo principio es aplicado en el klistrón, oscilador de alta frecuencia, donde los electrones son reagrupados o modulados en velocidad). Los grupos de iones de diferente masa viajan con diferente velocidad y por consiguiente se separan. En el lugar (sección perpendicular al haz) donde esto ocurre, un analizador aplica un campo eléctrico focalizador constituído por una componente radiofrecuente sincronizada con la llegada del grupo. La sincronización es tal que la componente variable del campo transversal presenta intensidad cero cuando el grupo de los iones U-235 pasa a través y presenta el máximo cuando en cambio pasa el grupo de iones U-238. El haz de U-235 es focalizado en un colector mientras los U-238 son desviados. Así la separación queda realizada.

11.26. Este esquema fué descrito el 18 de diciembre de 1941 en una reunión del Comité del Uranio y en seguida fué discutido más en detalle por Lawrence, que visitó Princeton. Lo que el método prometía pareció suficiente para justificar un trabajo experimental que empezó inmediatamente después me-

diante un contrato de la O S R D y siguió hasta febrero de 1943. Debido a que la idea expuesta era original se presentaban dos posibilidades: (1) que el método diera resultado: (2) que pudiera ser utilizado para la producción en gran escala bastante rápidamente como para competir con los métodos más ortodoxos empleados.

11.27. Fué construído un isotrón experimental y puesto en marcha al final de enero de 1942. Los experimentos preliminares indicaron en aquel entonces que los isótopos del litio podían ser separados por este método. El primer éxito en recoger isótopos de uranio parcialmente separados se logró en la primavera de 1942.

11.28. Desgraciadamente, los progresos durante el verano y el final de 1942 no fueron tan rápidos como se había esperado. Por consiguiente se decidió abandonar el proyecto de Princeton para permitir el envío de personal al lugar donde el laboratorio de la bomba atómica estaba por entrar en funcionamiento. Antes de que el grupo abandonara Princeton se había podido recoger en un pequeño isotrón experimental varias muestras de uranio parcialmente separado. Así el método dió resultado, pero su aplicabilidad en gran escala no fué definitivamente establecida.

EL MAGNETRÓN Y LA CENTRÍFUGA DE IONES

11.29. En diciembre de 1941, cuando todo el tema de la separación del isótopo estaba en discusión en Berkeley, fué propuesto el magnetrón como posible separador de masa. Entre tanto, Smyth, de Princeton, se puso en contacto con L. P. Smith de la Universidad de Cornell y había descubierto que éste y sus discípulos habían realizado un trabajo notable, con resultados evidentes, sobre la separación de los isótopos del litio precisamente mediante un método de este tipo. Esto fué expuesto por Lawrence en Wáshington en una de las reuniones del Comité del Uranio de diciembre de 1941. Lawrence inmediatamente se puso en contacto con Smith con el resultado de que éste trabajó sobre el método de Berkeley desde febrero a junio de 1942. J. Slepian, del Laboratorio de Investigaciones de la Westinghouse de East de Pittsburgh, se trasladó a Ber-

keley en el invierno de 1941-1942 por invitación de Lawrence y se interesó en una modificación del magnetrón que fué llamada centrífuga iónica. Slepian se quedó en Berkeley la mayor parte del tiempo hasta el final de 1942 y luego volvió a East Pittsburgh, donde prosiguió el trabajo.

11.30. Hasta entonces no había sido obtenida la separación del uranio en el magnetrón. Experimentos con litio empleando corrientes débiles de iones habían mostrado cierta separación pero no se habían podido lograr resultados de importancia con una elevada corriente iónica. En el caso de la centrífuga iónica las muestras de uranio que habían sido recogidas habían mostrado una separación apreciable pero los resultados no habían sido bien puestos en claro.

LA SITUACIÓN TAL COMO ERA A COMIENZOS DE 1943

11.31. Con la virtual eliminación del isotrón y de la centrífuga iónica del programa de desarrollo el calutrón quedó como el único método en el cual se trabajó intensivamente. La construcción de unidades iniciales de una instalación había sido autorizada y los proyectos para estas unidades habían quedado establecidas intensivamente, pero el programa electromagnético había existido durante sólo un poco más de un año y era evidente que los proyectos aprovechables estaban basados más en conjeturas perspicaces que en una investigación adecuada. Una situación análoga habría podido presentarse con la pila con reacción en cadena de haberse podido aprovechar una cantidad ilimitada de uranio y de grafito antes que se hubiera desarrollado la teoría o antes que las constantes nucleares hubieran sido bien determinadas. Por suerte la naturaleza de los dos proyectos era muy distinta, siendo una aventura menos especulativa la construcción apresurada de una instalación electromagnética que la que habría resultado en el caso de la pila. Más rápidamente de lo que podían progresar con ventaja la investigación y el desarrollo, las unidades iniciales de la instalación fueron construídas y funcionaron.

CONSTRUCCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DESDE MARZO 1943 HASTA JUNIO 1945

Comparación entre las instalaciones de difusión y de plutonio

11.32. Los precedentes capítulos muestran que el final de 1942 fué época de decisiones para el proyecto del uranio. Puesto que precisamente en este tiempo por primera vez fué producida una reacción en cadena autosostenida, se autorizó la construcción de la instalación de plutonio de Hanford, la instalación de difusión de Clinton y la instalación electromagnética de Clinton. La instalación de difusión era mucho más flexible que la instalación de plutonio, pues la primera podía ser subdividida en secciones y etapas hechas enteramente o en parte para producir cantidades variables de U-235 de grado distinto de enriquecimiento. La instalación electromagnética era además más flexible porque cada unidad de separación era prácticamente independiente de las demás unidades. El proceso de separación consistía en cargar una unidad, hacerla marchar por algún tiempo, y luego detenerla y sacar el producto. Para seguridad, las unidades estaban construídas en grupos, pero la mayor parte de los controles estaban separados para cada unidad. Esta peculiaridad hacía posible la construcción de la instalación por partes y hacer entrar en función la primera parte aun antes de que la segunda fuera empezada. Resultaba además posible variar el proyecto de las unidades sucesivas durante la construcción; dentro de ciertos límites era además posible substituir las unidades envejecidas en los grupos anteriores con unidades recién desarrolladas.

NATURALEZA Y ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO DE DESARROLLO

11.33. La construcción de las primeras series de unidades electromagnéticas en Clinton empezó en marzo de 1943 y esta parte de la instalación estuvo lista para funcionar en noviembre de 1943. El grupo en Berkeley continuó mejorando las fuentes de iones, el receptor y el equipo auxiliar, tratando siempre de obtener corrientes iónicas más grandes. En efecto,

los informes de Berkeley describen no menos de 71 tipos de fuentes distintas y 115 distintos tipos de receptores, todos los cuales llegaron a la etapa de dibujo y muchos fueron construídos y ensayados. Tan pronto como el valor de la substitución de un determinado proyecto era probado, se hacía el mayor esfuerzo para incorporarlo en el plan de las nuevas unidades.

11.34. Esta clase de desarrollos requerían un intercambio continuo de informes entre el laboratorio, la parte de ingeniería, la construcción, y los grupos que trabajaban. Afortunadamente el enlace era excelente. Las compañías situaron representantes en Berkeley y miembros del grupo de investigación de esa localidad hacían visitas frecuentes y prolongadas a la instalación de Clinton. En efecto, algunos investigadores fueron trasladados al personal de la Compañía Eastman de Tennessee que manejaba la instalación en Clinton, y un grupo de más de cien físicos, investigadores e ingenieros que hasta entonces habían quedado en Berkeley, fueron asignados a Clinton. Sobre todo en las primeras etapas del trabajo los hombres de Berkeley situados en Clinton fueron muy valiosos como "descargadores de inconvenientes" y como instructores de los operadores. Una sección de la instalación seguía siendo una unidad de instalación experimental para el ensayo de los equipos modificados y para revisar los procesos de fabricación, y estaba a cargo del grupo de Berkeley y de la Tennessee Eastman. Además del grupo británico ya mencionado, puesto bajo la dirección de Oliphant, existía en Clinton un grupo de químicos ingleses bajo la dirección de J. W. Baxter.

PROBLEMAS QUÍMICOS

11.35. Originariamente, las sales de uranio empleadas como fuentes de vapor para la producción de arcos iónicos no habían sido investigadas con minuciosidad en Berkeley, pero al desarrollarse este proceso se hizo una gran cantidad de trabajo sobre estas sales, y se efectuó una investigación para compuestos del uranio que fueran mejor que los empleados originariamente. Se hicieron también algunos estudios valiosos sobre los métodos de producir los compuestos elegidos.

11.36. El problema químico más importante era la recupe-

ración de los compuestos de uranio provenientes de las unidades de separación. Este proceso de recuperación consistía en dos fases. En las unidades de la primera etapa era esencial recobrar el uranio separado de los receptores con la máxima eficiencia, mientras que recobrar el uranio no separado disperso en las otras partes de la unidad era menos importante. Pero si se emplean unidades de número elevado de etapas aun el material de partida contiene una elevada concentración de U-235, y es necesario recobrar todo el material en la unidad al final de cada recorrido, es decir, el material que queda en la fuente iónica y el material depositado sobre los electrodos de aceleración, sobre las paredes de la cámara magnética, y sobre las paredes del receptor.

LA INSTALACIÓN DE DIFUSIÓN TÉRMICA

11.37. Durante casi un año la instalación electromagnética era la única que funcionaba. Por lo tanto era muy grande el apremio para aumentar su valor de producción. Se había comprobado que cualquier método de enriquecimiento —aun de escaso enriquecimiento— del material que alimentaba la instalación hubiera aumentado apreciablemente el valor de la producción. Por ejemplo, una unidad electromagnética que podía producir un gramo por día de 40 % de U-235 puro partiendo de uranio natural podía producir 2 gramos por día de 80 % de U-235 si la concentración del U-235 en el material de alimentación era dos veces la concentración natural (1.4 por cien en lugar de 0.7 por cien).

11.38. Ya hemos hablado del trabajo hecho por P. H. Abelson, del Laboratorio de Investigación Naval, sobre la separación de los isótopos del uranio por medio de difusión térmica en un compuesto líquido del uranio. En la primavera de 1943 Abelson había establecido una unidad de instalación experimental que efectuaba una separación apreciable de una cantidad considerable de compuesto de uranio. Por eso se propuso construir una instalación de difusión térmica en gran escala. Tal instalación hubiera sido más barata que cualquier otra instalación en gran escala, y podía construirse más rápidamente. Su principal inconveniente era su enorme consumo

de vapor, que parecía hacerla impracticable para la entera tarea de separación.

11.39. No solamente existía ya una unidad de instalación experimental en el Laboratorio de Investigación Naval, sino que una segunda, un poco más grande, estaba construyéndose en la "Philadelphia Navy Yard". Con la cooperación de la Armada ambos servicios de Abelson y los proyectos para una instalación en gran escala llegaron a ser aprovechables para el Manhattan District. Se decidió levantar la instalación de difusión térmica en gran escala en Clinton (empleando el vapor de la instalación de fuerza construída para la instalación de difusión gaseosa) y emplear el producto de la instalación de difusión térmica como material de alimentación para la instalación electromagnética.

11.40. Esta nueva instalación de difusión térmica fué levantada en un plazo asombrosamente corto durante el verano de 1944. A pesar de algunos desengaños, el funcionamiento de esta instalación tuvo éxito en su propósito de aumentar considerablemente el valor de producción de la instalación electromagnética. Esto estimuló también el trabajo relacionado con el problema de la recuperación del uranio. El futuro de esta instalación es incierto. El funcionamiento de la instalación de difusión gaseosa hace difícil obtener bastante vapor, pero proporciona también otro consumidor para su producto.

PROBLEMAS VARIOS

11.41. Aunque los problemas científicos y técnicos que el grupo de Berkeley abordaba no eran probablemente tan variados o numerosos como los problemas encontrados en Chicago y Columbia, sin embargo fueron bastante abundantes. Surgieron muchos problemas en el problemas en el proyecto de la fuerza eléctrica y de los circuitos de control, de los campos magnéticos, de los aisladores, de las bombas de vacío, de los tanques, de los colectores y de las fuentes. Más aún: algunos aparatos tenían que ser proyectados obedeciendo al azar y luego producidos en gran cantidad y con gran anticipación.

ESTADO ACTUAL

11.42. La instalación de separación electromagnética funcionó en gran escala durante el invierno de 1944-1945, y produjo U-235 de pureza suficiente para su empleo en las bombas atómicas. Su eficiencia de funcionamiento está siendo continuamente aumentada. El trabajo de investigación prosigue aunque en escala reducida.

RESUMEN

11.43. En los primeros días del proyecto del uranio, los métodos electromagnéticos de separación de isótopos fueron rechazados por los efectos esperados de la carga espacial. Al final de 1941 el asunto fué puesto otra vez en discusión; experimentos hechos en Berkeley mostraron que los efectos de la carga espacial podían ser ampliamente superados. En consecuencia se emprendió un programa en gran escala para el desarrollo de los métodos electromagnéticos.

11.44. Entre los varios tipos de métodos electromagnéticos propuestos, el calutrón (desarrollado en Berkeley) mereció la principal atención. Se estudiaron otros métodos nuevos, uno en Berkeley, el otro en Princeton. El separador de masa del calutrón, consiste en una fuente iónica, un sistema de aceleración en el cual los iones son acelerados a altas velocidades, un campo magnético en el cual los iones viajan en semicírculos de radio que depende de la masa iónica, y de un sistema de receptor. Los problemas principales de este método comprenden la fuente iónica, el sistema de aceleración, la divergencia del rayo iónico, la carga espacial, y la utilización del campo magnético. La ventaja principal del calutrón consiste en un factor de separación grande, corto tiempo de circulación, y corto tiempo de arranque, y flexibilidad de funcionamiento. Al final de 1942 se habían hecho suficientes progresos como para justificar la autorización de la construcción de la instalación, y un año más tarde las unidades de la primera instalación estaban listas para la prueba en la "Clinton Engineer Works" en Tennessee.

11.45. El trabajo de investigación y desarrollo sobre el calutrón fué continuado principalmente en el Laboratorio de Radiación de la Universidad de California, bajo la dirección de Lawrence. La Westinghouse, la General Electric y Allis Chalmers construyeron la mayor parte de las piezas; Stone y Webster construyeron la instalación, y la Tennessee Eastman tomó a su cargo el funcionamiento.

11.46. Puesto que el método de separación del calutrón consistía en operaciones conjuntas de una gran cantidad de unidades muy independientes, fué posible introducir importantes mejoras aún después que el funcionamiento de la instalación había empezado.

11.47. En el verano de 1944 fué construída una instalación de separación de difusión térmica en Clinton Engineer Works para proporcionar material de alimentación enriquecido para la instalación electromagnética y aumentar el valor de producción de esta última instalación. El proyecto de la instalación de difusión térmica estaba basado sobre los resultados obtenidos en el Laboratorio de Investigación Naval y sobre la instalación experimental construída por el Departamento de la Armada en la Philadelphia Navy Yard.

11.48. Aunque el trabajo de investigación sobre el calutrón empezó más tarde que el realizado sobre los sistemas de centrifugación difusión, la instalación del calutrón fué la primera en producir grandes cantidades de isótopos separados del uranio.

Capítulo XII

EL TRABAJO SOBRE LA BOMBA ATÓMICA

EL OBJETIVO

12.1. El entero propósito del trabajo descrito en los precedentes capítulos fué conocer la posibilidad de crear bomba atómica y producir los materiales concentrados fisionables que se habían requerido para tales bombas. En el presente capítulo, será descripta la última etapa de la tarea: la fabricación progresiva en Los Álamos de la bomba atómica misma. Como en otras partes del proyecto, hay que considerar dos fases: la organización y el trabajo científico y técnico. La organización será descripta brevemente: el resto del capítulo será dedicado a los problemas técnicos y científicos. Razones de seguridad impiden una exposición de muchas de las más importantes fases de este trabajo.

HISTORIA Y ORGANIZACIÓN

12.2. La reorganización del proyecto, que ocurrió al comienzo de 1942, y el subsiguiente traslado gradual del trabajo de la protección de O S R D al Departamento Manhattan han sido descripto en el capítulo V. Se recordará que las tareas del Laboratorio Metalúrgico de Chicago incluían originariamente un estudio preliminar de la física de la bomba atómica. Algunos de tales estudios fueron hechos en 1941; y a comien-

zos de 1942 G. Breit obtuvo que varios laboratorios (véase capítulo VI, § 6.38) empezaran el estudio experimental de problemas que había que solucionar antes de que se pudieran hacer progresos sobre el proyecto de la bomba. Como hemos expuesto en el capítulo VI, J. R. Oppenheimer, de la Universidad de California, reunió en el verano de 1942 un grupo para una ulterior investigación teórica y emprendió también la coordinación de este trabajo experimental. Este grupo estaba oficialmente bajo la dirección del Laboratorio Metalúrgico, pero el grupo teórico realizó la mayor parte de su trabajo en la Universidad de California. En el verano de 1942, cuando el general L. R. Groves se hizo cargo de todo el proyecto, se decidió ampliar considerablemente el trabajo y en el menor tiempo posible, instalar un laboratorio por separado.

12.3. Las más importantes consideraciones en la elección de un lugar para este laboratorio de bomba atómica fueron el secreto y la seguridad. Por eso se decidió establecer el laboratorio en una localidad aislada y cortar las conecciones inútiles con el mundo exterior.

12.4. En noviembre de 1942 se eligió un lugar —Los Álamos—, en Nuevo México. Estaba situado sobre una llanura elevada, más o menos a 48 kilómetros de Santa Fe. Una ventaja de este sitio era la de disponer de un área considerable para la prueba, pero al principio las construcciones en el lugar consistían en un puñado de casas donde antaño había existido una pequeña escuela de pupilos. Allí no había laboratorio, ni biblioteca, ni casas de comercio, y tampoco una instalación de fuerza adecuada. El único medio de llegar allí era un tortuoso camino de montaña. El hecho de que se llegó a superar los obstáculos en un grado considerable se debe a los esfuerzos sin límites del personal científico y militar.

12.5. J. R. Oppenheimer fué director del laboratorio desde el comienzo. Él llegó al lugar en marzo de 1943, y en seguida se reunieron allí grupos y personas de las Universidades de Princeton, Chicago, California, Wisconsin, Minnesota y de otras partes. Con la valiosa colaboración del general L. R. Groves, de J. B. Conant y de otros, Oppenheimer siguió reuniendo a su alrededor científicos de reconocida competencia, así que

el final de 1944 encontró una extraordinaria reunión de astros de la ciencia en esta llanura del Nuevo México. El reclutamiento del personal científico más joven y de los técnicos fué más difícil, pues para muchas personas las desventajas del sitio no eran siempre compensadas por una apreciación de la magnitud de la meta propuesta; el empleo de personal de la Sección de Ingeniería Especial mejoró considerablemente la situación.

12.6. Naturalmente la tarea de concentrar allí los aparatos necesarios, las máquinas, y el equipo fué enorme. Tres coches cargados de aparatos de proyecto de Princeton llenaron algunas de las más urgentes exigencias. Pronto llegaron un ciclotrón desde Harvard, dos generadores de Van der Graaf desde Wisconsin, y un aparato de alto voltaje de Cockcroft-Walton desde Illinois. Como dato ilustrativo de la velocidad con que el laboratorio fué instalado, podemos recordar que la pieza polar del magneto del ciclotrón no fué colocada hasta el 14 de abril de 1943 y el primer experimento fué realizado a comienzos de julio. Se adquirieron muchos otros aparatos y se construyeron laboratorios subsidiarios. Hoy en día éste es probablemente el laboratorio de investigaciones físicas mejor equipado del mundo.

12.7. Los fondos para el laboratorio se fijaron en un contrato entre el Departamento Manhattan y la Universidad de California.

ESTADO DE LOS CONOCIMIENTOS EN ABRIL DE 1943

Discusión general del problema

12.8. En el capítulo II hemos hablado de las condiciones generales requeridas para producir una reacción en cadena autosostenida. Señalamos que existían cuatro procesos en competencia para los neutrones: (1) la captura de neutrones por el uranio de resulta en la fisión; (2) la captura sin fisión por el uranio; (3) la captura sin fisión por las impurezas; y (4) la huída de neutrones del sistema. Por eso la condición para obtener una tal reacción en cadena es (1) que el proceso produzca tantos nuevos neutrones como los que se han gastado o

perdido en los cuatro procesos. Se señaló que (2) podía reducirse removiendo el U-235 o empleando una estructura especial y el moderador, que (3) puede reducirse alcanzando un alto grado de pureza química, y que (4) puede reducirse (relativamente) aumentando el tamaño del sistema. En las primeras discusiones sobre las reacciones en cadena siempre se tenía el convencimiento de que el sistema de reacción en cadena no podía detenerse. Ahora consideraremos cómo se detiene.

12.9. Por definición, una explosión es una repentina y violenta liberación de una gran cantidad de energía en una pequeña región. Pára producir una explosión eficiente en una bomba atómica, las partes de la bomba no tienen que separarse apreciablemente antes que se libere una fracción substancial de la energía nuclear disponible, puesto que la expansión lleva a un aumento en la pérdida de los neutrones del sistema y así a un final prematuro de la reacción en cadena. En otras palabras, la eficiencia de la bomba atómica dependerá de la relación de velocidad con que los neutrones engendrados por la primera fisión lleguen dentro de otro núcleo y produzcan la fisión sucesiva, y (b) de la velocidad con que la bomba se desprenda. Empleando los principios conocidos de la generación de energía, de temperatura de elevación de presión, y de expansión de los sólidos y de los vapores, era posible evaluar el orden de magnitud del intervalo de tiempo entre el comienzo y el final de la reacción nuclear en cadena. Casi todas las dificultades técnicas del proyecto provenían de la extraordinaria brevedad de este intervalo de tiempo.

12.10. En los primeros capítulos expresamos que una reacción en cadena no podía producirse en un trozo de metal uranio puro, de cualquier tamaño debido a la captura de neutrones por parte de U-238. Esta conclusión se obtuvo de muchos cálculos teóricos y también de la experiencia directa. Para producir una pila no explosiva el método consistente en una estructura que contiene un moderador es suficiente, debido a que reduce suficientemente el efecto parásito de las capturas. Para producir una unidad explosiva, en cambio, queda demostrado que este proceso no es satisfactorio desde dos puntos de vista. Primero, los neutrones térmicos tardan tanto (tantos microsegundos) en actuar que resultaría una explosión muy

pequeña. En segundo lugar, una pila es demasiado grande para poderse transportar. Es, pues, necesario evitar las capturas parásitas eliminando la mayor parte del U-238 o emplear plutonio.

12.11. Por supuesto, estos conceptos generales y otros habían sido bien establecidos antes de que el proyecto de Los Álamos se concretara.

TAMAÑO CRÍTICO

12.12. El cálculo del tamaño crítico de una unidad que actúa en cadena es un problema que ya ha sido discutido a propósito de las pilas. Sin embargo, el cálculo es más simple para una unidad de metal homogéneo que para una estructura. En el curso del primer trabajo habían quedado imprecisiones, sea debido a la falta de un conocimiento suficiente de las constantes, sea debido a dificultades matemáticas. Por ejemplo, la difusión, la fisión y las secciones eficientes de absorción del núcleo implicaban todas variaciones con la velocidad del neutrón. Los detalles de tales variaciones no eran conocidos experimentalmente y era difícil tenerlos en cuenta en el desarrollo de los cálculos. En la primavera de 1943 se habían hecho varias estimaciones del tamaño crítico por distintos métodos de cálculos y empleando las mejores constantes nucleares disponibles, pero los límites de imprecisión continuaban siendo amplios.

EL REFLECTOR O RETARDADOR

12.13. En una pila de uranio-grafito que reacciona en cadena, el tamaño crítico puede ser reducido considerablemente envolviendo la pila con una capa de grafito, lo que se debe a que una tal envoltura "refleja" muchos neutrones devolviéndolos a la pila. Una tal envoltura puede emplease para reducir el tamaño crítico de la bomba, pero en tal caso la envoltura desempeña además otro papel: su gran inercia retarda la expansión del material en reacción. Por esta razón una envoltura semejante es a menudo llamada un retardador. El empleo

de un retardador por supuesto hace la explosión más intensa y más eficiente durante mayor tiempo. El retardador más eficiente es el que presenta la más elevada densidad; resulta sin importancia una gran resistencia mecánica a la tracción. Es una afortunada coincidencia que los materiales de alta densidad son también excelentes reflectores de neutrones.

EFICIENCIA

12.14. Como ya hemos observado, la bomba tiene tendencia a hacerse pedazos a medida que adelanta la reacción y la fractura detiene la reacción. El cálculo de cuánto puede expandirse la bomba antes que la reacción se detenga es relativamente sencillo. El cálculo del tiempo empleado por la expansión y de cuánto tiempo dura la reacción es mucho más difícil.

12.15. Mientras el efecto de un retardador es aumentar la eficiencia ya sea reflejando neutrones, ya atrasando la expansión de la bomba, el efecto sobre la eficiencia no es tan grande como el efecto sobre el volumen crítico. La razón de esto es que el proceso de reflexión toma tiempo y puede no ocurrir extensamente antes que se haya acabado la reacción en cadena.

DETONACIÓN Y MONTAJE

12.16. Como expresamos en el capítulo II, es imposible impedir una reacción en cadena cuando el tamaño es mayor del tamaño crítico. Porque hay siempre bastantes neutrones (provenientes de los rayos cósmicos, de las reacciones espontáneas de fisión o de las reacciones provocadas en las impurezas por partículas alfa) para iniciar la cadena. Así que hasta el momento en que se desea que estalle, la bomba tiene que consistir de un número de partes separadas, cada una de las cuales es inferior al tamaño crítico ya por ser pequeña, ya por su forma. Para producir la detonación las partes de la bomba tienen que ser juntadas rápidamente. Durante el proceso de reunión la reacción en cadena está a punto de arrancar —debido a la presencia de neutrones extraviados— antes que la bomba haya alcanzado la forma más compacta

más reactiva). Por consiguiente, la explosión tiene tendencia a oponerse a que la bomba alcance la forma más compacta. Este hecho puede provocar una explosión ineficaz y relativamente inútil. El problema, por lo tanto, presenta dos aspectos: (1) reducir el tiempo de reunión al mínimo; (2) reducir el número de neutrones extraviados al mínimo (predetonación).

12.17. Fué considerado el peligro de producir un "fiasco" o sea una detonación tan ineficaz que ni siquiera la bomba misma resultara completamente destruída. Esto, naturalmente, habría entregado al enemigo una fuente de material de alto valor.

RENDIMIENTO

12.18. En los capítulos II y IV subrayamos que la cantidad de energía liberada no era el único criterio para juzgar una bomba. No había ninguna seguridad de que una bomba de uranio que liberara una energía igual a la energía liberada por 20.000 toneladas de TNT habría sido militarmente tan efectiva en la destrucción como 10.000 bombas de 2 toneladas. En efecto, había buenas razones para pensar que el efecto destructivo por caloría liberada decreciera al aumentar la cantidad total de energía liberada. Por otra parte, en las bombas atómicas la cantidad total de energía liberada por kg de material fisionable (o sea el rendimiento de la energía liberada) aumenta con el tamaño de la bomba. Así que el tamaño óptimo de una bomba atómica no resultaba tan fácil de determinar. Un aspecto táctico que complica ulteriormente el problema es la ventaja de destruir simultáneamente una amplia superficie de territorio enemigo. En una evaluación completa del rendimiento de una bomba atómica no hay que olvidar los efectos morales (*). La bomba se hace detonar en el campo de batalla a una altura tal sobre el suelo como para obtener el máximo efecto destructivo contra las defensas, y para desparramar los productos radioactivos en una nube. Debido a la altura de

(*) El resto de este párrafo ha sido autorizado por el Ministerio de Guerra después del primer empleo de las bombas atómicas contra el Japón.

la explosión todos los productos radioactivos son prácticamente llevados hacia arriba en una columna ascendente de aire caliente y desparramados sobre una superficie amplia sin peligro. Aun en el ensayo en Nuevo México, donde la altura de la explosión fué necesariamente baja, sólo una muy pequeña fracción de la radioactividad fué depositada inmediatamente por debajo de la bomba.

12.19. Puesto que se habían hecho cálculos de la velocidad de reunión de las masas subcríticas de U-235 bastante rápidamente como para evitar la predetonación, se habían proporcionado buenos elementos de juicio respecto a los métodos prácticos para llegar a eso. La más evidente manera de juntar muy rápidamente una bomba atómica era colocar una parte como proyectil en un cañoncito, enfrentada con una segunda parte como blanco. La masa del proyectil, su velocidad y el calibre del cañón a emplearse no resultaron muy distintos de los normales, pero surgían nuevos problemas debido a la importancia de lograr un repentino y perfecto contacto entre proyectil y blanco y el requisito de transportabilidad. Ninguno de estos problemas técnicos fué estudiado con especial detenimiento antes de la creación de los laboratorios de Los Álamos.

12.20. Pudo también ponerse en evidencia que probablemente podían concebirse esquemas en que estuvieran presentes absorbedores de neutrones en la bomba de manera tal que los nutrones volvieran menos efectivas las etapas iniciales de las reacciones en cadena. Así la tendencia de la bomba a detonar prematuramente y sin eficiencia podía ser reducida al mínimo. Estos dispositivos para aumentar la eficiencia de la bomba son llamados autocatalíticos.

RESUMEN DE LOS CONOCIMIENTOS ALCANZADOS EN ABRIL DE 1943

12.21. En abril de 1943 la información disponible de algún interés en lo tocante al proyecto de la bomba atómica era sólo preliminar e imprecisa. Era urgentemente necesaria una ulterior obra teórica sobre tamaño crítico, eficiencia y efecto del retardador, método de detonación y rendimiento. Había que extender y mejorar las mediciones de las constantes nucleares

del U-235, del plutonio y del material del retardador. Se habían hecho tentativas de mediciones en los casos de U-235 y plutonio empleando sólo cantidades minúsculas en la espera de que estuvieran disponibles mayores cantidades.

12.22. Entre estos problemas de física teórica y experimental se infiltraban problemas de química, metalurgia y técnica que apenas habían sido abordados. Ejemplos de éstos son la purificación y la fabricación del U-235 y del plutonio y la fabricación del retardador. Por último, había los problemas de juntar instantáneamente las partes de la bomba que eran suficientes para causar vértigos por su complejidad.

EL TRABAJO DEL LABORATORIO - INTRODUCCIÓN

12.23. Para fines administrativos la plana mayor científica estaba distribuída en siete divisiones, que tuvieron que modificarse muchas veces. En la primavera de 1945 las divisiones eran: División de Física Teórica, bajo la dirección de H. Bethe, División de Física Nuclear Experimental bajo R. R. Wilson; División de Metalurgia y Química bajo el capitán W. S. Parsons (USN); División de Explosivos, bajo G. B. Kistiakowsky; División de Física de la bomba, bajo R. F. Bacher, y una División de Desarrollo de vanguardia, bajo E. Fermi. Todas las divisiones dependían de J. R. Oppenheimer, director del Laboratorio de Los Álamos, que había sido ayudado en la coordinación de la investigación por S. K. Allison desde el mes de diciembre de 1944. J. Chadwick, de Inglaterra y N. Bohr, de Dinamarca, estuvieron mucho tiempo en Los Álamos y dieron consejos muy valiosos. Chadwick era el cerebro de la delegación británica que contribuyó materialmente al éxito del laboratorio. Por razones de seguridad, la mayor parte del trabajo del laboratorio puede ser descrita sólo parcialmente.

SECCIÓN DE FÍSICA TEÓRICA

12.24. Había dos circunstancias que dieron una importancia desacostumbrada al trabajo de la División de Física Teórica dirigido por H. Bethe. La primera de éstas consistía en la

necesidad de efectuar un desarrollo simultáneo de todo, desde los materiales fundamentales hasta el método de aplicación de los mismos — todo a pesar de la virtual no aprovechabilidad de los materiales (U-235 y plutonio) y de completa novedad de los procesos. La segunda circunstancia consistía en la imposibilidad de producir (como para fines experimentales) una explosión atómica en "pequeña escala" empleando sólo una pequeña cantidad de material fisionable. (No ocurre ninguna explosión a menos que la masa de material fisionable supere la masa crítica). Así que era necesario proceder por datos obtenidos en experimentos hechos sobre cantidades infinitesimales de materiales y relacionarlos con las teorías disponibles tan cuidadosamente como era posible para hacer cálculos de lo que podía ocurrir en la bomba. Sólo en ese sentido fué posible hacer proyectos apreciables para los otras partes de la empresa y tomar decisiones sobre los planes y la construcción sin esperar experimentos precisos sobre grandes cantidades de material. Para dar unos pocos ejemplos diremos que el trabajo teórico requería hacer determinaciones brutas de la dimensión del cañón, guiar a los metalúrgicos en la elección de los materiales del retardador, y determinar la influencia de la pureza del material fisionable sobre la eficiencia de la bomba.

12.25. La determinación del tamaño crítico de la bomba era uno de los problemas principales de la División de Física Teórica. Con el tiempo, se hicieron varias mejoras en la aproximación teórica, por lo que se hizo posible tomar en cuenta todos los fenómenos complejos que la física teórica implicaba. Al principio se consideró que la difusión de neutrones fuera semejante a la difusión del calor, pero esta ingenua analogía tuvo que abandonarse. En el primer trabajo teórico se suponía que los neutrones tuvieran todos la misma velocidad y que todos fueran dispersados isotrópicamente. Por eso se dessarrolló un método que permitía el cálculo del tamaño crítico para varias formas de material fisionable siempre que el libre recorrido medio de los neutrones fuera el mismo en el material moderador como en el material fisionable. Este método fué más tarde mejorado, primero tomando en cuenta la dispersión angular y en segundo término considerando la diferencia del libre recorrido medio en los dos materiales: del núcleo y del

tierra, la determinación de la eficiencia de una detonación por debajo de la superficie del océano, etc.

12.30. Además del trabajo antes recordado, mucha actividad fué dedicada a la estimación de las experiencias preliminares. Por ejemplo, se analizó la dispersión hacia atrás de neutrones producida por varios materiales de retardador propuestos. Se hizo además un análisis de los resultados de experimentos sobre la multiplicación de neutrones en cantidades de material fisionable inferiores al tamaño crítico.

SECCIÓN DE FÍSICA NUCLEAR EXPERIMENTAL

12.31. Los experimentos realizados por el grupo de Física Nuclear Experimental de Los Álamos eran de dos clases: "Experimentos diferenciales", para determinar la sección efectiva para la fisión de un isótopo específico mediante neutrones de una velocidad específica, y "experimentos integrales" para la determinación de la dispersión media de los neutrones de fisión debida al retardador.

12.32. Muchas constantes nucleares ya habían sido determinadas en la Universidad de Chicago en el Laboratorio Metalúrgico y en otros lugares, pero quedaba todavía por determinar un número importante de constantes, en particular aquellas que implicaban neutrones de velocidad elevada. Algunos de los problemas básicos eran los siguientes:

1. ¿Cuáles son las secciones efectivas de fisión del U-234, U-235, U-238, Pu-239, etcétera? ¿Cómo varían con la velocidad de los neutrones?

2. ¿Cuáles son las secciones efectivas de dispersión elástica para los mismos núcleos (y también para los núcleos del material del retardador? ¿Cómo varían con la velocidad de los neutrones?

3. ¿Cuáles son las secciones efectivas inelásticas para los núcleos antes nombrados?

4. ¿Cuáles son las secciones efectivas de absorción para procesos distintos de la fisión?

5. ¿Cuántos neutrones son emitidos por fisión en el caso de cada uno de los núcleos antes nombrados?

6. ¿Cuál es la explicación satisfactoria del hecho que el número de neutrones emitidos por fisión no es un número entero?

7. ¿Cuál es la energía inicial de los neutrones producidos por fisión?

8. ¿Puede el número o la energía de tales neutrones variar con la velocidad de los neutrones incidentes?

9. Los neutrones de fisión ¿son emitidos inmediatamente?

10. ¿Cuál es la probabilidad de fisión espontánea de los varios núcleos fisionables?

12.33. Además de la tentativa de hallar las contestaciones a estas preguntas, la sección de física nuclear experimental de Los Álamos estudiaba muchos problemas de gran interés científico que tenía que desempeñar un papel importante en el dispositivo final. Sea o no del caso aplicarlos, la cantidad de conocimientos así acumulada por la sección forma una parte integral e imposible de evaluar en todas las investigaciones sobre problemas nucleares.

12.34. *Métodos experimentales.* Los capítulos anteriores no contienen o tratan muy superficialmente las técnicas experimentales, excepto aquellas para la observación de las partículas veloces (cargadas) (véase Apéndice I). Para obtener la contestación a las diez preguntas antes formuladas, debemos:

(1) Determinar el número de neutrones para cada energía dada;
(2) Producir neutrones de cada energía deseada;
(3) Determinar los ángulos de deflección de los neutrones dispersados;
(4) Determinar el número de las fisiones que se producen;
(5) Poner en evidencia otras consecuencias de la absorción, por ejemplo: radioactividad artificial.

Indicaremos rápidamente cómo se hacen estas observaciones.

12.35. *Cómo se evidencian los neutrones.* Existen tres maneras de evidenciar los neutrones: por la ionización producida por núcleos atómicos livianos impulsados a velocidad elevada por colisiones elásticas con neutrones, por la desintegración

radioctiva de un núcleo inestable que se haya formado por absorción de neutrones y por la fisión resultante de la absorción de neutrones. Los tres caminos llevan a la producción de iones y la ionización resultante puede ser evidenciada mediante el empleo de electroscopios, de cámaras de ionización, de contadores de Geiger y Müller, de cámaras de Wilson, trazas en emulsiones fotográficas, etc.

12.36. Mientras evidenciar los neutrones no es difícil, el determinar las velocidades presenta cierta dificultad. El método de la cámara de Wilson y de la emulsión fotográfica da los resultados más directos pero es poco cómodo. Más a menudo se emplean varias combinaciones de materiales absorbentes selectivos. Así, por ejemplo, si se sabe que una hoja absorbe sólo neutrones de una clase particular de energías y se la interpone en el recorrido de los neutrones y luego se la saca, su grado de radioactividad es, dentro de ciertos límites, proporcional al número de neutrones de la clase de energías considerada. Otro método consiste en estudiar la radioactividad que se sabe es producida sólo por neutrones cuya energía es inferior a un nivel dado.

12.37. Un esquema elegante para estudiar los efectos de los neutrones de una sola velocidad, arbitrariamente elegida, es el método por "tiempo de vuelo". En este método una fuente de electrones es modulada, o sea, se hace emitir a la fuente neutrones por cortas "explosiones" o "impulsos". En cada impulso están presentes muchos neutrones cuyas velocidades son muy variadas. El material de la pantalla y el detector se hallan a considerable distancia de la fuente (varios pies o 90 centímetros de ésta). El detector es también "modulado" y con el mismo período. La sincronización o desfasaje es tal que el detector responde sólo durante un corto intervalo, que empieza cierto tiempo después que la ola de neutrones ha abandonado la fuente. De esta forma todo efecto registrado por el detector (como fisiones en una capa de uranio depositada sobre la superficie interior de una cámara de ionización) es el resultado exclusivo de los neutrones que llegan en el momento en que hay respuesta y luego de haber viajado desde la fuente durante cierto lapso. En otras palabras, los

efectos medidos son debidos sólo a los neutrones que poseen una velocidad adecuada.

12.38. *Producción de neutrones.* Todos los neutrones son producidos como resultado de reacciones nucleares, y su velocidad inicial depende del valor energético de la reacción particular. Si la reacción es endotérmica, esto es, si la masa total de las partículas resultantes es mayor que la masa inicial de las partículas, la reacción no puede realizarse hasta que la energía cinética de la partícula que bombardea no es superior a cierto valor. Para energías de bombardeo más elevadas, las energías cinéticas de las partículas resultantes, en particular de los neutrones, crecen al aumentar la energía cinética de los proyectiles más arriba del nivel límite. Así la reacción $Li^7(p, n)Be^7$ absorbe 1,6 mev de energía siendo las partículas producidas más pesadas que las partículas iniciales. Toda ulterior energía de los protones incidentes es transformada en energía cinética de los productos, así que la máxima velocidad de los neutrones producidos crece con la velocidad de los protones incidentes. Por lo tanto, para lograr neutrones de un orden limitado de velocidad, hay que emplear un blanco delgado, los neutrones deben ser emitidos con un mismo ángulo y los protones que llegan sobre el blanco deben poseer todos la misma velocidad.

12.39. Al aplicar las mismas leyes de la conservación de la energía y del momento a las reacciones nucleares exotérmicas se ve que la energía liberada es generalmente grande comparada con la energía cinética de las partículas proyectiles y por lo tanto es ésta la que determina la velocidad de los neutrones. A menudo existen varios órdenes de velocidad debidos a la misma reacción. Existen reacciones que producen neutrones de energía muy elevada (próxima a 15 mev).

12.40. Como el número de reacciones nucleares aptas para fuentes de neutrones es limitado, se pueden producir directamente sólo neutrones de cierto orden de velocidad. No es difícil volver los neutrones más lentos, pero es imposible volverlos más lentos de manera uniforme, esto es, sin modificar la distribución de las velocidades. El método más eficiente para hacer lentos los neutrones es el empleo de un moderador, como

en la pila de grafito; en efecto, la pila misma es una excelente fuente térmica (es decir de muy baja velocidad) o de neutrones térmicos.

12.41. *Determinación de los ángulos de deflección.* Las dificultades de medición de los ángulos de deflección de los neutrones se deben a la intensidad y a la dispersión. El número de neutrones difundidos en una particular dirección puede ser relativamente pequeño y los neutrones difundidos casi siempre comprenden muchos neutrones perdidos que no provienen del blanco en estudio.

12.42. *Determinación del número de fisiones.* La determinación del número de fisiones producidas por neutrones o que ocurre de manera espontánea es relativamente simple. Se pueden emplear cámaras de ionización, tubos contadores, y muchos otros tipos de detectores.

12.43. *Manera de evidenciar los productos de la captura de los neutrones.* A menudo es útil conocer en detalle lo qué ocurre a los neutrones que son absorbidos sin producir fisiones, por ejemplo la resonancia o la captura "radioactiva" de los neutrones por parte de U-238 para formar U-239, lo que lleva a la producción del plutonio. Tales estudios comúnmente suponen una combinación de separaciones microquímicas y de análisis de la radioactividad.

12.44. *Algunos experimentos sobre constantes nucleares.* Desde el tiempo en que se estaba instalando el laboratorio de Los Álamos se hizo mucho trabajo relativo a los efectos de los neutrones lentos sobre los materiales entonces disponibles. Por ejemplo, fué evaluada la sección efectiva de fisión del uranio natural para neutrones térmicos y lo mismo se hizo para los isótopos separados del uranio y para el plutonio. Fueron publicados algunos datos sobre las secciones efectivas de fisión para neutrones de alta velocidad y otros datos fueron utilizados en los laboratorios del proyecto. Para aumentar y mejorar estos datos Los Álamos perfeccionó el empleo del generador de Van der Graaff para la reacción $Li^7(p, n)Be^7$, a fin de producir neutrones de toda energía deseada desde 3.000 hasta 2.000.000 de electrón volt. Se alcanzaron éxitos en la modulación del haz del ciclotrón y en el desarrollo del método "tiempo de vuelo" de neutrones para producir efectos de muchos inter-

valos de velocidad a la vez. Se imaginaron métodos especiales para llenar los huecos en el rango de energía de los neutrones. Particularmente importante resultó el aumento de precisión en las medidas que se logró tan pronto como fueron recibidas mayores cantidades de U-235, U-238 y plutonio. En conjunto el valor de la sección efectiva para la fisión en función de la energía del neutrón, es ahora bastante bien conocido para estos materiales desde cero a 3.000.000 de electrón volt.

12.45. *Algunos experimentos integrales.* Dos "experimentos integrales" (experimentos sobre sistemas montados o integrales que comprenden material fisionable, reflector y a veces también el moderador) pueden ser descritos. En el primero de estos experimentos integrales fué construído un sistema que reacciona en cadena que comprendía una cantidad relativamente grande de U-235 en solución líquida. Éste había sido proyectado para funcionar a un nivel de energía muy bajo y no poseía sistema de refrigeración. Su objeto era proporcionar una verificación de los efectos previstos para un sistema de reacción que contiene U-235 enriquecido. Los resultados fueron muy cercanos a lo previsto.

12.46. El segundo experimento integral fué efectuado sobre una pila que contenía una mezcla de uranio y de un moderador hidrogenado. En esta primera realización la pila era así una pila cuya reacción en cadena era debida a los neutrones lentos. La pila fué luego construída nuevamente empleando menos hidrógeno. En esta realización de la pila la fisión por neutrones rápidos se volvió importante. La pila fué construída muchas veces, empleando siempre menor cantidad de hidrógeno. Durante esta serie de reconstrucciones el carácter de la reacción era paulatinamente alterado de manera que la fisión por neutrones térmicos se volviera siempre menos importante mientras la fisión por neutrones rápidos se volvía más y más importante aproximando así las condiciones que debían encontrarse en la bomba.

12.47. *Resumen de los resultados en física nuclear.* Las constantes nucleares del U-235, del U-238 y del plutonio fueron medidas con razonable grado de precisión en orden de energías de neutrones que abarca desde la térmica hasta 3.000.000 de electrón volt. En otras palabras se pudo contestar

a las preguntas 1, 2, 3, 4 y 5 de las 10 que fueron formuladas al comienzo de este párrafo. El espectro de fisión (pregunta 7) para el U-235 y el Pu-239 resultó bastante bien conocido. Fué estudiada la fisión espontánea (pregunta 10) para distintos tipos de núcleos. Fueron obtenidos resultados preliminares en lo que se refiere a las preguntas 6, 8 y 9 acerca de los detalles del proceso de fisión.

SECCIÓN DE QUÍMICA Y METALURGIA

12.48. La sección de Química y Metalurgia del Laboratorio de Los Álamos estaba bajo la dirección conjunta de J. W. Kennedy y C. S. Smith. Tenía a su cargo la purificación final de los materiales enriquecidos fisionables, la fabricación del núcleo de la bomba, retardador, etc., y varios otros problemas. En todo este trabajo de la sección sobre materiales fisionables enriquecidos era preciso tener especial cuidado de que no se desperdiciaran cantidades apreciables del material que era más precioso que el oro. Los procedimientos ya bien establecidos en Chicago y en otros lugares para la purificación y la fabricación del uranio natural no eran a menudo satisfactorios para tratar muestras de U-235 altamente enriquecidas.

SECCIONES DE ARTILLERÍA, EXPLOSIVOS Y BOMBAS FÍSICAS

12.49. La exposición anterior del trabajo de las secciones de física técnica, de física nuclear experimental de química y metalurgia es muy incompleta debido a que importantes aspectos de este trabajo no pueden ser revelados aquí por razones de seguridad. Por las mismas razones debemos excluir del todo los trabajos de las secciones de artillería, explosivos y bombas físicas.

RESUMEN

12.50. En la primavera de 1943 fué edificado en Los Álamos, Nuevo México, un nuevo laboratorio bajo la dirección de

J. R. Oppenheimer con el fin de investigar y proyectar la construcción de la bomba atómica partiendo del U-235 o plutonio hasta el empleo de la bomba. El nuevo laboratorio mejoró la parte teórica del proyecto y el estado de los problemas, perfeccionó y extendió las mediciones de las constantes nucleares implícitas, desarrolló métodos de purificación de los materiales a emplearse y por último planeó y construyó bombas atómicas que funcionaban.

Capítulo XIII

SUMARIO GENERAL

ACTUAL SITUACIÓN GENERAL

13.1. Como resultado de los trabajos de organización del Departamento Manhattan en Wáshington y en Tennessee, de los trabajos de los grupos científicos en Berkeley, Chicago, Columbia, Los Álamos y en otras partes, de los trabajos de los grupos industriales en Clinton, Hanford y en muchos otros lugares, a fines de junio de 1945 esperábamos cada día recibir la trascendental noticia de la explosión de la primera bomba atómica concebida por el hombre. Se creía que todos los problemas habían sido solucionados al fin lo bastante bien como para que fuese posible la fabricación de una bomba. Había sido demostrada la reacción en cadena mantenida por neutrones debidos a fisión nuclear; habían sido establecidas las condiciones necesarias para obligar una tal reacción a desarrollarse en forma explosiva y éstas condiciones habían sido alcanzadas; las instalaciones de producción de tipos distintos están en funcionamiento fabricando una cantidad de material explosivo. Aunque no sepamos cuándo ocurrirá la primera explosión ni qué poder tendrá, el anuncio de este acontecimiento precederá la publicación de este informe. Aun si la primera tentativa fuera relativamente poco eficaz, no cabe la menor duda que los esfuerzos ulteriores darán buenos resultados; la devastación causada por una sola bomba se espera

que será comparable a la de la más grande incursión aérea efectuada con métodos usuales.

13.2. Ha sido obtenida un arma cuyo poder destructivo va más allá de todo lo imaginable; un arma tan adecuada para un ataque de sorpresa que las mayores ciudades de un país pueden ser destruídas en una sola noche por una nación que simule amistad. Esta arma ha sido creada no por la inspiración diabólica de algún genio sin escrúpulos sino por la dura labor de millares de hombres y mujeres normales que han trabajado por la seguridad de su país. Muchos de los principios que han sido aplicados eran bien conocidos por el mundo científico en 1940. El desarrollar los procesos industriales necesarios partiendo de estos principios costó mucho tiempo, esfuerzo y dinero, pero los procesos que hemos elegido para un esfuerzo serio condujeron al éxito y muchos que no elegimos probablemente habrían dado también buen resultado. Poseemos una ventaja inicial de tiempo porque, por lo que sabemos, los otros países no han sido capaces de realizar trabajos análogos durante el período de guerra. Poseemos también una ventaja general en lo que respecta al esfuerzo científico y en particular relativa al esfuerzo industrial, pero esta ventaja puede fácilmente perderse.

13.3. Antes de la rendición de Alemania, siempre había una posibilidad de que los hombres de ciencia y los ingenieros germanos lograran cambiar el curso de la guerra. Por lo tanto no quedaba otra alternativa que dedicarse a esta clase de trabajo en los Estados Unidos. Al comienzo muchos hombres de ciencia pudieron esperar y esperaron en efecto que aparecería algún principio demostrativo de que las bombas atómicas eran intrínsecamente imposibles. Esta esperanza se desvaneció poco a poco; afortunadamente, al mismo tiempo, la magnitud del esfuerzo industrial necesario también era ya una realidad, así que se debilitaba el temor de que los éxitos alemanes se anticipasen a la terminación de la obra. Por la misma razón muchos de nosotros estamos seguros de que los japoneses no pueden construir y emplear esta arma con eficiencia.

PREVISIÓN

13.4. En lo que se refiere al futuro podemos suponer que los desarrollos técnicos seguirán dos direcciones. Desde el punto de vista militar existe cierta justificada seguridad de que habrá mejoras ya sea en los procesos para producir material fisionable o en su empleo. Cabe pensar que pueden descubrirse métodos enteramente distintos de transformar materia en energía puesto que no hay que olvidar que la energía liberada en la fisión del uranio corresponde a la utilización de solo más o menos la centésima parte de su masa. De descubrirse una manera de transformar en energía tan sólo un pequeño porcentaje de la materia de algún material común, la civilización tendrá los medios de suicidarse en masa, si así lo quiere.

13.5. Los empleos posibles de la energía nuclear no son todos destructivos y la segunda orientación en que se pueden esperar desarrollos técnicos es precisamente en el mundo de la paz. Al final de 1944 el general Groves designó una comisión para que estudiara tales posibilidades en cuanto pudieran tener un significado bélico. Esta comisión (cuyo presidente era el Dr. R. C. Tolman; y asesores el contralmirante E. W. Mills (USN), el capitán T. A. Solberg (USN), los doctores W. K. Lewis y H. D. Smyth) recibió muchas sugestiones de los hombres de las varias secciones del proyecto, sobre todo en lo que se refiere al empleo de la energía nuclear como central de energía y al empleo de subproductos radioactivos con fines científicos, médicos, e industriales. Mientras todos estaban de acuerdo en que podía surgir una gran industria comparable, por ejemplo, con la industria electrónica, no todos opinaban lo mismo en cuanto a la rapidez con que habría podido crecer tal industria. Por lo general se pensaba que este crecimiento sería lento durante muchos años. Por lo menos, no es inmediata la posibilidad de fabricar y emplear coches movidos por energía nuclear o de iluminar casas con lámparas radioactivas, pero existe una cierta probabilidad de que la energía nuclear para fines especiales pueda ser desarrollada en un período de diez años y que la producción normal de materiales radioactivos produzca un efecto profundo en la in-

vestigación científica y tal vez en el tratamiento de ciertas enfermedades.

PLAN PARA EL FUTURO

13.6. Durante la guerra el esfuerzo consistía en lograr los máximos resultados militares. Desde cierto tiempo había resultado evidente que alguna clase de fiscalización y ayuda del gobierno en el campo de la energía nuclear debía seguir después de la guerra. Muchos de los hombres que pertenecían al proyecto habían reconocido este hecho y habían hecho varias proposiciones, algunas de las cuales fueron consideradas por el Comité de Tolman aunque éste era tan solo un Comité provisional de asesoramiento que daba comunicaciones al general Groves. Un Comité intermedio de primera categoría ha sido ahora formado para estudiar planes para la continuación de la organización. Este Comité discute también problemas de política general en los cuales han estado profundamente interesados muchos de los hombres que han resultado de importancia fundamental, comenzó desde que el trabajo y especialmente desde que las probabilidades de éxito se fueron acentuando.

LOS PROBLEMAS ANTE LA OPINIÓN PÚBLICA

13.7. Nos encontramos con un explosivo que está lejos de haber sido completamente perfeccionado. Ahora las futuras posibilidades de tales explosivos son aterradoras y sus efectos sobre las futuras guerras y los asuntos internacionales revisten importancia fundamental. Aquí está un nuevo instrumento para la humanidad, un instrumento de un poder destructivo inimaginable. Su desarrollo origina muchas preguntas que tienen que ser contestadas en el futuro inmediato.

13.8. Debido a las limitaciones de seguridad militar no hay posibilidad para el Parlamento y el pueblo de discutir estas preguntas. Éstas han sido tomadas seriamente en cuenta por todos los interesados y debatidas fogosamente entre los hombres de ciencia, y las conclusiones alcanzadas han sido comunicadas a las más altas autoridades. Estas preguntas no son preguntas técnicas; sino preguntas políticas y sociales, y las

contestaciones dadas a las mismas pueden afectar a toda la humanidad durante varias generaciones. Pensando en ellas los que colaboraron en el proyecto han estado pensando como ciudadanos de los Estados Unidos profundamente interesados en el bienestar de la humanidad. Ha sido su deber y el de los oficiales superiores responsables a quienes se había encomendado mirar, más allá de los límites de la presente guerra y de sus armas, hacia las últimas consecuencias de estos descubrimientos. Ésta fué una responsabilidad harto onerosa. En un país libre como los Estados Unidos, tales preguntas deberían ser debatidas por el pueblo y las decisiones tomadas también por el pueblo mediante sus representantes. Ésta es una de las razones que explican la publicación de este informe. Es un informe semi-técnico que esperamos permitirá a los hombres de ciencia de este país ayudar sus conciudadanos a alcanzar decisiones sensatas. El pueblo del país debe ser informado para permitir a los hombres de ciencia descargar su responsabilidad.

Apéndice I

MÉTODOS DE OBSERVACIÓN DE LAS PARTÍCULAS RÁPIDAS PRODUCIDAS POR REACCIONES NUCLEARES

En el capítulo I hemos subrayado la importancia de la ionización en el estudio de la relatividad y hemos mencionado el electroscopio. En este apéndice recordaremos un método de importancia histórica comparable al electroscopio pero que no se emplea más, y luego revisaremos varios métodos actualmente empleados para observar las partículas alfa, las partículas beta (o positrones), los rayos gama y los neutrones o sus efectos.

CENTELLEOS

El método más directo para "ver" un átomo es percibir el destello de luz que una partícula alfa o un protón de alta velocidad produce cuando choca contra una pantalla fluorescente. Todo lo que se necesita es una placa de vidrio recubierta de sulfuro de zinc, un microscopio de pequeño aumento, una cámara oscura, un ojo bien descansado, y una fuente de partículas alfa. La mayoría de los célebres experimentos de Rutherford, inclusive el mencionado en el párrafo 1.17, implicaba contar los centelleos, pero el método es aburrido y por lo que el autor sabe, ha sido enteramente reemplazado por métodos eléctricos.

EL PROCESO DE IONIZACIÓN

Cuando una partícula cargada y de alta velocidad, como una partícula alfa, o un electrón, pasa a través de la materia, ésta desintegra la molécula que golpea debido a las fuerzas eléctricas entre la partícula cargada y los electrones de la molécula. Si el material es gaseoso, los fragmentos resultantes o iones pueden desplazarse si está presente un campo eléctrico; entonces los electrones extraídos de las moléculas se mueven en una dirección y los iones positivos que quedan se mueven en otra. Una partícula beta de un millón de electrón volt de energía produce algo así como 18.000 átomos ionizados antes de ser detenida del todo debido a que en promedio, ella gasta más o menos 60 volts de energía en cada choque ionizante. Como cada proceso de ionización hace nacer un ion positivo y un ion negativo, habrá un total de 36.000 cargas liberadas por un electrón de alta velocidad, pero como cada carga es de sólo $1,6 \times 10^{-19}$ coulomb, el total es de sólo más o menos 6×10^{-15} coulomb, que es todavía muy poco. El mejor galvanómetro que se puede construir mide una carga de más o menos 10^{-10} coulomb. Es posible llevar la sensibilidad de un electrómetro hasta más o menos 10^{-16} coulomb, pero el electrómetro es un instrumento de empleo muy incómodo.

Una partícula alfa produce una ionización comparable con la de una partícula beta. Ésta es detenida más rápidamente pero produce más iones por unidad de recorrido. Una radiación gama es un agente de ionización mucho menos eficiente debido a que el proceso es del todo distinto. Éste puede ocasionalmente liberar un electrón de una molécula en virtud del "efecto Compton" o por efecto fotoeléctrico y este electrón secundario posee una energía suficiente para producir ionización. Un neutrón, como ya decimos en el texto, ioniza sólo indirectamente llevando a una velocidad muy elevada un núcleo por choque elástico o rompiendo un núcleo con el resultado de ionizar mediante los fragmentos.

Si queremos poner de manifiesto los efectos de ionización de estas partículas, tenemos evidentemente que emplear el efecto

resultante de una gran cantidad de partículas o poseer medios muy sensibles de medir corrientes eléctricas.

EL ELECTROSCOPIO

En esencia, el electroscopio determina en qué grado el aire que le rodea se ha vuelto conductor como resultado de los iones que se han producido en él.

El tipo más simple de electroscopio está constituído por una hoja de oro de pocos centímetros de largo suspendida por una articulación a un vástago vertical aislado. Si el vástago es cargado, la hoja de oro se carga también de la misma carga y se levanta formando un ángulo que resulta de la repulsión de dos cargas iguales. Tan pronto como la carga desaparece la hoja gradualmente baja hacia la varilla y la velocidad con que se desplaza mide la conductividad del aire que le rodea.

Un tipo más perfeccionado de electroscopio fué imaginado por C. C. Lauritsen, quien substituyó con un hilo de cuarzo a la hoja de oro y empleó la elasticidad del hilo como fuerza opositora en lugar de la gravedad. El hilo se vuelve conductor por un delgado recubrimiento metálico. Como antes el instrumento es cargado, y el hilo después de una defleción inicial, vuelve gradualmente atrás a su posición de sin carga. La posición del hilo es leída mediante un microscopio de pequeño aumento. Estos instrumentos pueden ser portátiles, sólidos y bastante sensibles. Ellos constituyen un instrumento standard para verificar el nivel de las radiaciones gama y en particular para protegerse contra una exposición peligrosa.

CÁMARAS DE IONIZACIÓN

Una cámara de ionización mide el número total de iones producidos directamente en ella. Comúnmente consiste en dos electrodos planos entre los cuales hay un campo eléctrico lo bastante fuerte como para atraer todos los iones a los electrodos antes que ellos se unan de nuevo, pero no bastante fuerte para producir iones secundarios como en los instrumentos que describiremos ahora.

Con un cuidadoso diseño y con el empleo de amplificadores

sensibles, una cámara de ionización puede medir un número de iones tan bajo como el producido por una sola partícula alfa, o puede ser empleada como un electroscopio para medir la cantidad total de radiación ionizante presente instantáneamente, o puede dar la cantidad total de ionización producida en un período de tiempo dado.

CONTADORES PROPORCIONALES

Mientras las cámaras de ionización pueden ser hechas de manera tal que reaccionen a cada partícula alfa, es mucho más conveniente emplear un dispositivo autoamplificador, es decir, hacer que los iones producidos originariamente produzcan otros iones en la misma región de manera que no haya necesidad de que el circuito amplificador sea tan sensible.

En un contador proporcional, uno de los electrodos es un hilo fino a lo largo del eje del segundo electrodo, que es un cilindro hueco. El efecto del hilo es el de crear un campo eléctrico intenso cerca de él, aun para diferencias de potencial relativamente pequeñas. El campo intenso rápidamente acelera los iones primarios formados por las partículas alfa, beta o fotones, y estos iones primarios acelerados (particularmente los electrones) a su vez, producen iones secundarios en el gas que llena el contador, de manera que el impulso total de corriente resulta muy aumentado.

Es posible diseñar y hacer funcionar tales contadores en forma tal que el número total de los iones formados sea proporcional al número de los iones primarios. Así, después de la amplificación un impulso de corriente puede verse sobre un osciloscopio, y la altura alcanzada por el oscilograma indica cuán efectiva ha sido la ionización de una partícula inicial.

Es muy fácil de este modo distinguir entre las partículas alfa y las partículas beta y los fotones, y el circuito puede ser arreglado para contar solamente los impulsos de las más grandes de una magnitud elegida. Así un contador proporcional puede contar partículas alfa sobre un fondo de partículas beta o puede también contar solamente las partículas alfa que tienen más de una energía determinada.

CONTADORES DE GEIGER - MÜLLER

Si se eleva el voltaje sobre un contador proporcional, llega un punto en que los iones primarios de una sola partícula alfa, beta o de un fotón producen una descarga a través de todo el contador y no meramente multiplican el número de iones primarios en la región en que se producen. Ésta es una acción de gatillo y la corriente es independiente del número de iones producidos; además la corriente continúa indefinidamente si no se la detiene. Su limitación puede ser lograda mediante un circuito exterior tal, que el potencial baje tan pronto como circula una corriente o bien empleando en el contador una mezcla de gases que "paraliza" la superficie del electrodo tan pronto como se produce la descarga eliminando momentáneamente la emisión del electrones; o también combinando los dos métodos.

El contador de Geiger y Müller fué realizado antes que el contador proporcional y sigue siendo el instrumento más sensible para evidenciar cualquier radiación ionizante, pero todo lo que puede hacer es contar toda radiación ionizante que pasa a través, ya se trate de una partícula alfa, protón, electrón o fotón.

EL "ARTE" DE MEDIR CON CONTADORES

Una cosa es describir los principios sobre que se basan las distintas cámaras de ionización, contadores y dispositivos análogos y otra es construirlos y hacerlos funcionar con éxito.

Ante todo, las paredes de la cámara del contador deben dejar entrar las partículas. Para las radiaciones gama no hay problema pero para los electrones de velocidad relativamente baja, para los positrones o para las partículas alfa las paredes del contador deben ser muy delgadas o poseer ventanas delgadas.

Además, los contadores pueden ser muy distintos uno de otro en los detalles, como la distancia entre electrodos y su tamaño, la naturaleza del gas que los llena, su presión, etcétera.

Por último, la interpretación de los resultados es operación

delicada. La absorción de las paredes del contador o de otros filtros externos debe ser tenida en cuenta; la geometría del contador en relación a la fuente debe ser considerada para deducir del recuento observado el número de partículas nucleares; finalmente hay que tener en cuenta las fluctuaciones estadísticas, puesto que todas las reacciones nucleares son regidas por leyes de probabilidad.

LA CAMARA A NEBLINA DE WILSON

Existe un método de hacer visibles partículas nucleares que dependen directamente de la ionización pero que no es un método eléctrico. Éste se basa en que un vapor sobresaturado se condensa más fácilmente sobre iones que sobre moléculas neutras. Si se enfría aire saturado con vapor de agua, por expansión precisamente, después que una partícula alfa ha pasado a través de éste, sobre los iones formados por la partícula alfa se condensan gotitas de agua que reflejan la luz de un haz luminoso intenso y así se puede fotografiar o ver y registrar el recorrido de la partícula alfa.

Este método empezó a ser aplicado por C. T. R. Wilson en Cambridge (Inglaterra) más o menos en 1912 y ha resultado de extraordinaria utilidad para estudiar las propiedades de las partículas alfa, protones, electrones, positrones, mesotrones, fotones y átomos rápidos por choques con partículas alfa, protones o neutrones. A diferencia del método por centelleo, su compañero de trabajo durante muchos años, este método no ha sido reemplazado y sigue siendo usado ampliamente, en particular para estudiar en detalle los choques entre partículas nucleares y átomos.

EL MÉTODO FOTOGRAFICO

Las trazas de las partículas individuales que pasan a través de la materia pueden también ser observadas en las emulsiones fotográficas, pero las longitudes del camino son tan pequeñas que tienen que ser observadas bajo un microscopio, donde aparecen como una serie de granos impresionados que marcan el camino de la partícula. Este método de observación

no requiere prácticamente ningún aparato, pero es aburrido y de utilidad limitada. Sin embargo, es posible, emplear el ennegrecimiento de un film fotográfico como una medida de exposición total a la radiación, procedimiento que ha sido empleado para completar o reemplazar los electroscopios en el control de seguridad en muchas partes del proyecto.

OBSERVACIÓN Y MEDICIÓN DE NEUTRONES

Ninguno de los métodos que hemos descripto es aplicable directamente a los neutrones, pero todos son directamente aplicables cuando los neutrones producen indirectamente iones. Esto ocurre de dos maneras, por colisión elástica y por reacción nuclear. Como hemos ya descripto, un neutrón rápido que pasa a través de la materia ocasionalmente se acerca a un núcleo atómico tan estrechamente como para proporcionarle un gran impulso y energía de acuerdo con las leyes de la colisión elástica. Por lo tanto, el núcleo se vuelve una partícula cargada de alta velocidad que producirá ionización en una cámara de ionización, en un contador o en una cámara de Wilson. Pero si el neutrón tiene baja velocidad, por ejemplo, térmica, el núcleo chocado no tendrá energía bastante para producir ionización. Si, por otra parte, el neutrón es absorbido y el núcleo resultante se separa con liberación de energía, se producirá ionización. Así, para revelar los neutrones de alta velocidad, se puede elegir entre las colisiones elásticas y la reacción nuclear, pero para velocidades térmicas, sólo servirá la reacción nuclear.

La reacción empleada más común es la ${}_5B^{10}$ (n, α) ${}_3Li^7$, que libera más o menos 2.5 mev de energía repartida entre la partícula alfa resultante y el núcleo ${}_3Li^7$. Esto es suficiente para producir la ionización. Esta reacción es empleada llenando una cámara de ionización o un contador proporcional con gas trifluoruro de boro, y la reacción ocurre en la región donde se produce la ionización; como una alternativa, el interior de la cámara o del contador se reviste con boro. La cámara de ionización sirve, entonces, como un instrumento para medir el flujo total de neutrones mientras que el contador proporcional registra el número de neutrones uno por uno.

Uno de los métodos más valiosos para medir la densidad neutrónica por medio de las reacciones nucleares depende de la producción artificial de núcleos radioactivos. Una hoja que se sabe se vuelve radioactiva bajo el bombardeo neutrónico se inserta en un punto en donde se quiere conocer la intensidad neutrónica. Después de un tiempo dado, se saca y se mide su actividad con un electroscopio o un contador. El grado de actividad que se obtiene es, por lo tanto, una medida del número de neutrones que ha sido absorbido. Este método tiene la desventaja evidente de que no puede dar una repuesta instantánea, como lo hace la cámara de ionización y el contador.

Uno de los métodos más interesantes aplicado en el proyecto es el empleo de la fisión del uranio como una reacción nuclear para la detección de neutrones. Ulteriormente, mediante la separación de isótopos, se pueden diferenciar neutrones rápidos y lentos.

Puesto que la probabilidad de producirse de una reacción neutrónica es distinta para cada reacción y para cada velocidad neutrónica, las dificultades de traducir los recuentos o las mediciones de corriente en números y velocidades de neutrones presentes son aún más grandes que para las otras partículas nucleares. Ninguno debe sorprenderse si dos hábiles investigadores dan números distintos por la misma constante nuclear, por ejemplo. Solamente con una serie intrincada de investigaciones coordinadas, comparadas e interpretadas cuidadosamente los hechos fundamentales pueden ser análogamente deducidos de distintas experiencias con instrumental distinto.

Apéndice II

UNIDADES DE MASA, CARGA Y ENERGÍA

MASA

Puesto que el protón y el neutrón son las partículas fundamentales en la constitución de todo núcleo, parecería natural emplear la masa de uno o del otro como unidad de masa. La elección sería probablemente la del protón, que es el núcleo de un átomo de hidrógeno. Hay buenas razones históricas y de otra clase para que no se eligiera ni el protón ni el neutrón. En cambio, la unidad de masa empleada en la física atómica y nuclear es 1/16 de la masa del isótopo de oxígeno predominante, 0^{16} y es igual a 1.6603×10^{-24} gramos. Expresada de acuerdo con esta unidad, la masa del protón es 1.00758 y la masa del neutrón es 1.00893. (Los químicos comúnmente emplean una unidad de masa ligeramente distinta).

CARGA

La unidad de carga eléctrica empleada en la ciencia nuclear es la carga positiva del protón. Es igual en magnitud pero opuesta en signo a la carga del electrón y por eso es llamada a menudo carga electrónica. Una carga electrónica es 1.60×10^{-19} coulombs. Cabe recordar que una corriente de 1 ampere que pasa durante un segundo transporta la carga de 1 coulomb, es decir, una carga electrónica igual a 1.60×10^{-19} amperes segundo.

ENERGÍA

La unidad de energía empleada en física nuclear es el electrón volt, que es definido como igual a la energía cinética que una partícula con una carga electrónica adquiere cayendo libremente en una caída de potencial de un volt. Es a menudo conveniente emplear una unidad un millón de veces más grande: el mega, electrón volt (Mev.).

La relación entre el electrón volt y las otras unidades de energía comunes se encuentra en la siguiente tabla:

TABLA DE CONVERSIÓN DE LAS UNIDADES DE ENERGÍA

Multiplicar	*Por*	*Para obtener*
Mev	1.07×10^{-3}	unidades de masa
	1.60×10^{-6}	ergs
	3.83×10^{-14}	g. cal.
	4.45×10^{-20}	kw/h
unidades de masa	9.31×10^{2}	Mev
	1.49×10^{-3}	ergs
	3.56×10^{-11}	g. cal.
	4.15×10^{-17}	kw/h
ergs	6.71×10^{2}	unidades de masa
	6.24×10^{5}	Mev
	2.39×10^{-8}	g. cal.
	2.78×10^{-14}	kw/h
g. cal.	2.81×10^{10}	unidades de masa
	2.62×10^{13}	mev
	4.18×10^{7}	ergs
	1.16×10^{-6}	kw/h
kw/hrs	2.41×10^{16}	unidades de masa
	2.25×10^{19}	Mev
	3.60×10^{13}	ergs
	8.60×10^{5}	g. cal.

Apéndice III

NEUTRONES DEMORADOS PROVENIENTES DE LA FISIÓN DEL URANIO

Como señalamos en el capítulo VI, el control de una pila con reacción en cadena es grandemente facilitado por el hecho que algunos de los neutrones que resultan de la fisión del uranio no son emitidos más que un segundo después de ocurrir la fisión. Era por lo tanto importante estudiar experimentalmente este efecto. Tales experimentos fueron descriptos por Snell Nedzel e Ibser en un informe de fecha 15 de mayo de 1942, del cual citamos lo que sigue:

"El presente experimento consiste en dos partes relacionadas entre sí — una se refiere a la curva de decaimiento, y la otra a la intensidad de los neutrones decelerados medidos en los mismos términos de los neutrones de fisión «instantáneo»."

LA CURVA DE EXTINCIÓN DE LOS NEUTRONES DEMORADOS

"La fuente de neutrones era el blanco de berilio del ciclotrón de la Universidad de Chicago, golpeado por un haz de deuterones de más de 20 μA de 8 mev. Cerca del blanco estaba colocado un casco hueco hecho de hierro delgado y que contenía 106 libras de U_3O_8. Estaba rodeado por más o menos 2 pulgadas de parafina. El interior del casco estaba también rellenado de parafina, exceptuando un agujero axil donde se hallaba un contador proporcional llenado de BF_3. El contador estaba conectado a través de un amplificador a un circuito en

escala ("escala de 64") equipado con luces intèrpoladas y un contador de impulsos Cenco. Un registrador del décimo de segundo impulsado por un motor sincrónico y un cronómetro con precisión del centésimo de segundo estaban montados en el tablero de control cerca de los indicadores de los contadores por impulso. Este grupo de indicadores a flecha y luminosos era fotografiado a intervalos de tiempo adecuado por un aparato blindado manejado a mano. El resultado era un registro sobre una película cinematográfica de tiempos y recuentos, los cuales permitían trazar las curvas de extinción.

"El procedimiento era el siguiente: Durante el bombardeo, el cronómetro era puesto en marcha y el registrador se hallaba continuamente en marcha; el contador y el amplificador estaban funcionando pero los impulsos que abandonaban el amplificador eran enviados a tierra. El indicador era puesto en cero. Después de una señal de llamada el ciclotrón era eliminado por un operador, mientras otro operador enviaba la señal de llamada el ciclotrón era eliminado por un operador, mientras otro operador enviaba la señal del amplificador al tablero y empezaba a tomar fotografías. Era fácil tomar la primera fotografía dentro del primer medio segundo de interrupción del ciclotrón. De sesenta a cien fotografías eran tomadas durante el funcionamiento. La necesidad de emplear simultáneamente un cronómetro y el registrador se debía al hecho de que se necesitaba una precisión del centésimo de segundo para medir el lapso entre fotografías durante la primera parte del funcionamiento, pero el reloj se descargaba y se detenía antes que el cómputo estuviera completo. El registrador daba luego una precisión suficiente para los últimos lapsos.

"Fueron registradas cuarenta experiencias variando las condiciones experimentales. Activaciones cortas de uno o dos segundos dieron las mejores soluciones para períodos cortos. Bombardeos prolongados durante 15 ó 20 minutos de muy cerca al blanco fueron empleados para producir actividades largas con un máximo intenso. Bombardeos de 5 minutos manteniendo el haz del ciclotrón tan constante como fué posible, fueron empleados para estudiar las intensidades de la saturación relativa de varias activaciones; en estos casos el haz

del ciclotrón fué reducido a 1 ó 2 μA para evitar que el recuento inicial se volviera demasiado veloz para el contador (300 por seg. fué considerado un límite superior razonable para un contador). Se empleaban dos contadores, uno con una sección eficaz para neutrones térmicos de 2,66 cm² y el otro de 0,43 cm². Después de una activación intensa podíamos seguir la extinción de los neutrones demorados durante 13 minutos. Los impulsos parásitos (probablemente debidos sobre todo a fisiones espontáneas causadas por neutrones) fueron tomados en cuenta y eliminados de las lecturas. Éstos eran más o menos 0,4 impulsos por segundo en el contador grande.

"Un estudio de todas las curvas de extinción dió el siguiente cuadro general de las actividades presentes en un emisor de neutrones:

TABLA I

Mitad de vida	*Intensidad relativa inicial activada hasta saturación*
57 ± 3 seg	0,135
24 + 2 "	1,0
7 + 2 "	1,2
2,5 + 2 "	1,2

"Cualquier actividad superior a 57 segundos empezaba a aparecer, aun después de los más intensos bombardeos, luego de 20 minutos. Las intensidades relativas iniciales dadas son los promedios de los valores obtenidos de las tres curvas.

"Estos resultados dan la siguiente ecuación para la curva de extinción de los neutrones demorados después de la activación hasta saturación:

"Actividad = constante $(1{,}2\ e^{-0{,}28\ t} + 1{,}2\ e^{-0{,}099\ t} + 1{,}0\ e^{-0{,}029\ t} + 0{,}135\ e^{-0{,}012\ t})$, donde t está expresado en segundos."

La segunda parte de las experiencias mide el número total de los neutrones emitidos en un lapso de 0,01 seg. a 2,0 mi-

nutos después que el ciclotrón ha sido detenido. Admitiendo que todos los neutrones demorados observados fueran en los primeros cuatro grupos medidos en la primera parte de las experiencias, el segundo resultado indica que 1,0 ± 0,2 por ciento de los neutrones emitidos en la fisión del uranio son demorados por lo menos de 0,01 seg. y más o menos 0,07 por ciento son demorados de un minuto. Eligiendo el valor efectivo de k, o sea el factor de multiplicación para una pila típica en funciones de sólo 1.01, con todo control eliminado y la variación de K con una barra de 0,002, el número de los neutrones demorados será suficiente para permitir un control fácil.

Apéndice IV

LA PRIMERA PILA CON REACCIÓN EN CADENA AUTOSOSTENIDA

En el capítulo IV hemos descripto brevemente la construcción y el funcionamiento de la primera pila con acción en cadena autosostenida. Aunque los detalles deben todavía ser omitidos por razones de seguridad, los párrafos que siguen dan una descripción un poco más completa basada sobre el informe de E. Fermi. Esta pila fué realizada por Fermi y sus colaboradores a fines de 1942.

DESCRIPCIÓN DE LA PILA

El proyecto original indicaba una pila aproximadamente esférica con los mejores materiales cerca del centro. Mediciones de control mostraron que el tamaño crítico había sido alcanzado antes de completar la esfera, y la construcción fué modificada en consecuencia. La estructura final puede describirse groseramente como un esferoide alargado achatado en la parte más alta, esto es, como la perilla de una puerta. Se deseaba tener el uranio o el óxido de uranio en trozos espaciados en una estructura cúbica embutida en grafito. Por consiguiente, el grafito fué cortado en ladrillos y colocado en capas, las cuales alternadamente contenían trozos de uranio en las esquinas. El tamaño crítico fué alcanzado cuando la pila llegó a una altura igual a sólo las tres cuartas partes de lo que se necesitaba de acuerdo con las más cuidadosas estimaciones. Por

lo tanto, fué agregada sólo una capa más. El grafito empleado era principalmente de la National Carbon Co., y de la Speer Graphite Co. La pila contenía 12.400 libras de metal, una parte del cual había sido proporcionada por la Westinghouse, parte por la Metal Hydrides y parte por Ames. Como había muchos más puntos en la estructura que trozos de metal, los restantes fueron rellenados con trozos prensados de óxido.

Con fines de contralor y experimentos, existían 10 canales que atravesaban la pila de parte a parte. Tres de éstos, cercanos del centro, eran empleados para las barillas de control y de seguridad. Además, para facilitar el experimento, y en particular para sacar muestras, una hilera de ladrillos de grafito que contenían uranio y que se hallaban cerca del centro de la pila, estaban dispuestos en forma tal que podían ser sacados fuera de la pila.

Esta esfera de grafito descansaba sobre un marco de madera colocado sobre el piso de tierra firme debajo del pabellón oeste de Stagg Field.

FUNCIONAMIENTO PREVISTO DE LA PILA

La estructura metálica en el centro de la pila y las dos otras partes más grandes de la estructura que constituyen el cuerpo restante de la pila habían sido estudiadas cada una por separado en los experimentos exponenciales 18, 27 y 29.

Éstos habían dado un factor de multiplicación de 1,07 para la estructura metálica y de 1,04 y 1,03 para las estructuras de óxidos, siendo la diferencia entre los dos últimos resultados debida al grafito empleado. Hay que recordar que estas cifras expresan los factores de multiplicación para estructuras de tamaño infinito. Por consiguiente, una predicción del factor de multiplicación efectivo k_{ef} para la pila tal como había sido realizada, dependía de la validez de la deducción de k de los experimentos exponenciales, de una manera de promediar correcta entre estructuras distintas, y de lo correcto de la deducción de k_{ef} del k medio para una estructura infinita. Aun cuando el primer diseño de la pila había sido deliberadamente generoso, su puesta en marcha antes de que fuera parcialmente completado indicaba que los valores de los fac-

tores de multiplicación tal como habían sido calculados partiendo de los experimentos exponenciales, serían demasiado bajos. El factor de multiplicación efectivo observado de la parte de estructura planeada que fué realizada era de más o menos 1,0006 cuando habían sido eliminados todos los absorbentes de neutrones.

MEDICIONES EFECTUADAS DURANTE LA CONSTRUCCIÓN

Una serie de mediciones fué efectuada mientras la pila se estaba realizando a fin de asegurar que las dimensiones críticas no fueran alcanzadas inadvertidamente. Estas mediciones servían también para controlar las propiedades de multiplicación de los neutrones de la estructura durante el montaje, haciendo así posible predecir dónde se alcanzaría el punto crítico.

En general todo detector de neutrones o de radiaciones gama puede ser empleado para medir la intensidad de la reacción. Los detectores de neutrones son algo preferibles debido a que dan una respuesta más rápida y no son afectados por las radiaciones de los productos de la fisión después que ésta ha ocurrido. En el caso en examen ambos detectores (contadores de trifluoruro de boro) y las cámaras de ionización para rayos gama, fueron distribuídos dentro y alrededor de la pila. Algunas cámaras de ionización fueron empleadas para hacer funcionar instrumentos de registro y controles automáticos de seguridad.

En la pila misma fueron hechas mediciones con dos tipos de detectores. Un contador de trifluoruro de boro fué introducido en un canal a más o menos 43 pulgadas del suelo, y sus lecturas fueron tomadas con frecuencia. Además, una hoja de indium fué irradiada cada noche en una posición tan cercana como era posible del centro efectivo de la pila, y a la mañana siguiente fué medida la actividad inducida y comparada con las lecturas del contador de trifluoruro de boro.

Los resultados de tales mediciones pueden expresarse de dos maneras. Desde que el número de neutrones secundarios producidos por la fisión aumenta constantemente mientras se constituye la pila, la actividad A inducida en una hoja de

indio standard en el centro aumentará constantemente al aumentar el número de capas de la pila. Una vez que el factor de multiplicación es aproximadamente uno, A teóricamente aumentará hasta el infinito. Como tal aproximación al infinito es difícil de observar, fué empleada una segunda manera de

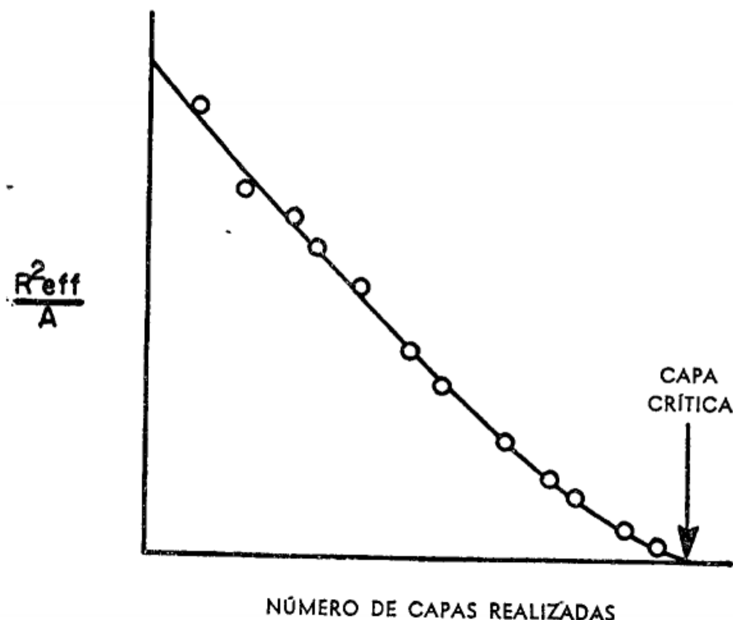


Figura 1

expresar los resultados. Supongamos que el espaciado de la estructura y la pureza de los materiales de una estructura de grafito-uranio sean tales que el factor de multiplicación sea exactamente uno si la estructura fuera una esfera de radio infinito. Entonces para una esfera de construcción igual pero de radio finito, la actividad de un detector colocado en el centro debe ser proporcional a la raíz cuadrada del radio.

Fué posible determinar un radio efectivo correspondiente R_{ef} para la pila real en cada una de sus varias etapas. La consecuencia era que si el factor k_∞ era precisamente uno como media para la estructura de la pila, la actividad A del detector en el centro debía aumentar al aumentar de R_{eff} en forma tal que $R^2{}_{ef}/A$ quedara constante, pero, si k_∞ de la estructura era mayor que uno, entonces como la pila se acerca al valor crítico, o sea como k_{ef} se acerca a uno, A debe acercarse a infinito y $R^2{}_{ef}/A$ se acerca a cero. Por consiguiente, extrapolando una curva de $R^2{}_{ef}/A$ versus el tamaño de la pila, o sea número de capas que el eje atraviesa, resultó posible determinar a qué capa k_{eff} se volvería uno. Una tal curva representada en la figura 1, indica en qué capa será alcanzada la dimensión crítica. Una manera menos útil pero más directa y más expresiva de registrar los resultados puede verse en la figura 2, que muestra el aumento de la actividad de los neutrones de la pila a medida que se agregan las capas.

Durante la construcción, bastante antes de alcanzar la capa crítica, fueron colocadas tiras de cadmio en ciertos canales adecuados.

Éstas fueron retiradas cada día con las debidas precauciones para poder registrar la aproximación a las condiciones críticas. La construcción fué proseguida de esta manera hasta la capa crítica.

CONTROL

La reacción fué controlada insertando en la pila algunas barras de material absorbente de neutrones —acero al boro o al cadmio—. Cuando la pila no estaba funcionando muchas barras eran introducidas en cierto número de aberturas, llevando el factor efectivo de multiplicación muy por debajo de uno. En efecto, cada una de las barras de cadmio era por sí sola suficiente para llevar la pila por debajo de las condiciones críticas. Además de las barras de cadmio que podían ser usadas para el manejo de la pila, ésta fué dotada de dos varillas de seguridad y de control. El control automático era impulsado por dos motores eléctricos controlados por

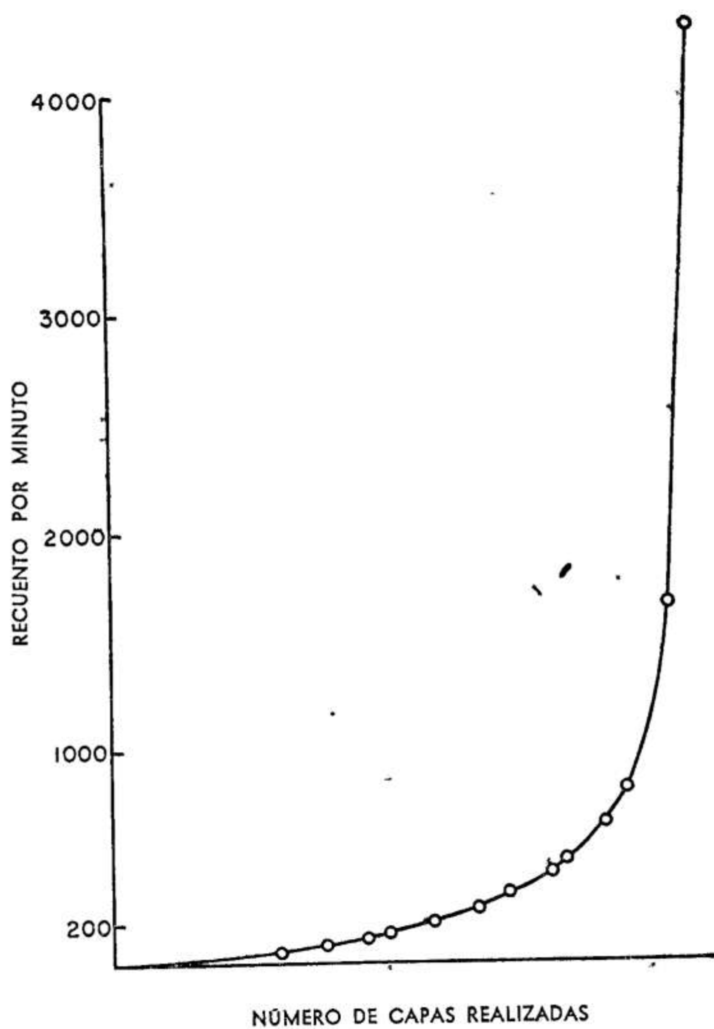

4000
3000
2000
1000
200
RECUENTO POR MINUTO
NÚMERO DE CAPAS REALIZADAS

Figura 2

una cámara de ionización a través de un sistema de amplificación, de manera tal que si la intensidad de la reacción aumentaba más de lo deseado la barra era introducida, y viceversa.

FUNCIONAMIENTO DE LA PILA

Para poner en función la pila todas las barras de cadmio con excepción de una, eran retiradas. La única que quedaba era empujada hacia afuera lentamente. Tan pronto como las condiciones críticas se aproximaban, la intensidad de los neutrones emitidos por la pila empezaban a aumentar rápidamente. Hay que decir además que, cuando esta última barra de cadmio estaba tan dentro de la pila que el factor efectivo de multiplicación era apenas inferior a uno, era necesario un tiempo relativamente largo para que la intensidad alcanzara el valor de saturación. De la misma manera, si la barra de cadmio estaba lo suficientemente retirada para que $k_{efect.}$ fuera mayor que uno, la intensidad se elevaba a un ritmo relativamente lento. Por ejemplo, si una barra se halla tan sólo un centímetro fuera de la posición crítica, el "tiempo de relajación", esto es, el tiempo necesario para que la intensidad se vuelva doble, es más o menos de cuatro horas. Estos largos "tiempos de relajación" eran el resultado del pequeño porcentaje de neutrones demorados que hemos expuesto en el Apéndice III, y hacían relativamente fácil el funcionamiento de la pila a un nivel constante de intensidad.

La pila empezó a funcionar el 2 de diciembre de 1942 hasta un máximo de energía producida de más o menos ½ w. El 12 de diciembre la intensidad había alcanzado más o menos 200 v, pero no se consideró seguro ir más arriba debido al peligro de la radiación para el personal de los edificios de los alrededores. Durante este funcionamiento con intensidad elevada, fueron efectuadas mediciones de la intensidad de la radiación cerca de la pila, en el edificio y en la acera correspondiente al mismo.

Apéndice V

TIPO DE LISTA DE INFORMES

Más abajo presentamos una lista de títulos de informes típicos preparados por el Laboratorio Metalúrgico de la Universidad de Chicago en el año 1942.

Una tabla para calcular el porcentaje perdido debido a la presencia de impurezas en la aleación.

Acerca de fuentes de neutrones radio-berilio.

Estimaciones preliminares de las radiaciones producidas por la fisión.

Cantidad básica de neutrones naturales en una pila de multiplicación.

Secciones eficaces de absorción para neutrones rápidos de *Rn* más *Be*.

Acerca de los esfuerzos mecánicos producidos por los gradientes de temperatura en las barras y en las esferas.

Efecto de la geometría sobre la absorción de los neutrones por resonancia por parte del uranio.

Protección contra las radiaciones.

Plan de experimentos sobre refrigeración líquida.

Informe sobre la posibilidad de purificar uranio mediante formación de carbonilo y de composición.

Sobre la radioactividad del helio como refrigerante.

Estimación de la estabilidad del éter bajo distintas condiciones de irradiación.

Venenos del uranio.

Actividad de los productos transuránicos y fisión.

Efectos químicos de la radiación sobre el aire que rodea la pila.

Estimación de los efectos químicos de la radiación sobre el agua que refrigera la pila.

Método de extracción para la purificación del nitrato de uranilo.

Difusión de los productos de la fisión a través del casco metálico a 600°C y a 1000°C.

Apéndice VI

PUBLICACIÓN DEL DEPARTAMENTO DE GUERRA SOBRE LA PRUEBA DE NUEVA MÉXICO EL 16 DE JULIO DE 1945

La transición satisfactoria de la humanidad a una nueva era, la era atómica, se reveló el 16 de julio de 1945, ante los ojos de un grupo expectante de científicos de renombre y de militares reunidos en las tierras desiertas del Nuevo México para testimoniar los primeros resultados de su esfuerzo, cuyo costo fué de 2.000.000.000 de dólares. Aquí, en una lejana división de la Base Aérea de Alamogordo, a 192 kilómetros al sureste de Albuquerque, la primera explosión atómica hecha por el hombre, la hazaña sobresaliente de la ciencia nuclear, fué llevada a cabo a las 5.30 de la mañana de aquel día. Cielos que se oscurecían, lluvia que caía a cántaros y relámpagos desde poco después de medianoche, aumentaban el aspecto impresionante del drama.

"Montada sobre una torre de acero, el arma revolucionaria destinada a cambiar la guerra tal como la conocemos, o que puede aún ser el instrumento para terminar con todas las guerras, partió como un impacto que dió la señal de la entrada del hombre en un nuevo mundo físico. El éxito fué más grande de lo que podían esperar los más ambiciosos. A una pequeña cantidad de materia, producto de una cadena de inmensas instalaciones industriales especialmente construídas, se le hizo liberar la energía del universo aprisionada dentro del átomo desde el comienzo del tiempo. Una hazaña fa-

bulosa había sido lograda. La teoría especulativa, escuetamente establecida en laboratorios de pre-guerra, se había materializado en la práctica.

"Esta fase del proyecto de la bomba atómica, encabezado por el mayor general Leslie R. Groves, estaba bajo la dirección del doctor J. R. Oppenheimer, físico teórico de la Universidad de California. Le correspondió el honor de llevar a cabo el instrumento de energía atómica para fines militares.

"La tensión antes de la detonación era altísima. Siempre existía la posibilidad de fallar. Un éxito demasiado grande, según algunos de los presentes, hubiera podido significar un arma incontrolable, y por ende, que no se podía emplear.

"La reunión final de la bomba atómica empezó en la noche del 12 de julio en un viejo rancho. A las varias reuniones muchos componentes llegaban de lugares lejanos, la tensión entre los científicos subió cada vez más. El más calmoso de todos era el hombre encargado de la parte vital de la reunión, el doctor R. F. Bacher, en tiempos normales profesor de la Universidad de Cornell.

"Tal era el costoso proyecto que representaba la construcción de ciudades completas; de instalaciones totalmente nuevas que ocupaban una superficie de muchos kilómetros, además de experimentos sin precedentes; gastos y esfuerzos que se sintetizan en la unidad experimental de la bomba y en sus partes. Aquí estaba el punto focal de la aventura. Ningún otro país en el mundo hubiera sido capaz de un tal desgaste en cerebros y en esfuerzos técnicos.

"El intenso significado de estos momentos decisivos antes de la prueba final fué bien percibido por estos hombres de ciencia. Ellos conocían plenamente su papel de iniciadores de una nueva era. Ellos sabían también que un movimiento falso los hubiera volado a ellos y con ellos todo su esfuerzo se hubiera perdido en la eternidad. Antes que la asamblea comenzara, el general de brigada Thomas F. Farrell, delegado del general Groves, firmó un recibo de gran importancia. Éste formalizaba la transferencia al ejército por parte de los científicos del material que no podía ser repuesto.

"Durante la última reunión preliminar se pasó un mal rato cuando se retardó el armado de una importante sección de la

bomba. La unidad entera fué trabajada con maquinaria exigiendo una dimensión muy precisa. La inserción estaba parcialmente efectuada cuando aparentemente se acuñó apretadamente y no iba más adelante. Sin embargo, el doctor Bacher fué firme y tranquilizó al grupo diciendo que el tiempo solucionaría el problema. Después de tres minutos la declaración del doctor Bacher se confirmó y el armado básico se completó sin ulteriores percances.

"Equipos especializados, que incluían eminencias en fases específicas de la ciencia, todos vinculados en un conjunto armónico, llevaron a término las partes de su especialización del armado. En cada grupo estaban sintetizados meses y aun años de esfuerzos metódicamente orientados.

"El sábado 14 de julio, la unidad que tenía que determinar el éxito o el fracaso de todo el proyecto subió a la cumbre de la torre de acero. Durante todo aquel día y el siguiente se desarrolló el trabajo de preparación. Además del aparato necesario para efectuar la detonación, se subió a la torre un instrumental completo para determinar la vibración y todas las reacciones de la bomba.

"El tiempo siniestro que había perseguido los preparativos de la bomba tuvo un efecto muy moderado sobre los expertos reunidos, cuyo trabajo se efectuó en medio de relámpagos y retumbar de truenos. El tiempo inclemente, factor inesperado, interrumpió la observación aérea del ensayo. También demoró la explosión fijada para las 4 de la mañana en una hora y media. Desde muchos meses antes se había fijado la fecha y el tiempo aproximado, y esto había sido uno de los secretos más importantes y mejor guardados de toda la guerra.

"El punto de observación más cercano fué establecido a casi 10.000 metros al sur de la torre donde se colocaron los controles para el ensayo protegidos por madera de construcción y tierra. En un lugar a 15.600 metros de la torre que podía proporcionar la mejor observación se situaron las figuras cumbres del proyecto de la bomba atómica. Éstas incluían al general Groves, al doctor Vannever Bush, jefe del Servicio de Investigación y Desarrollo Científico y al doctor James B. Conant, rector de la Universidad de Harward.

"La detonación estaba a cargo del doctor K. T. Bainbridge, del Instituto de Tecnología de Massachussetts. Él y el teniente Bush, del Departamento de Policía Militar, fueron los últimos en inspeccionar la torre con su bomba cósmica.

"A las tres de la madrugada el grupo se dirigió hacia la estación de control. El general Groves y el doctor Oppenheimer celebraron consulta con los meteorólogos. Se tomó la decisión de seguir adelante con el ensayo a pesar de la falta de seguridad de tener un tiempo favorable. Se estableció la hora: las 5 de la mañana.

"El general Groves se volvió a reunir con los doctores Conant y Bush y poco antes de la hora para el ensayo ellos se unieron a los muchos científicos congregados en Base Camp. A todos los presentes se les ordenó tenderse en el suelo, boca abajo, las cabezas más lejos de la dirección de la explosión.

"La tensión alcanzó un alto grado de intensidad en la sala del control al acercarse la línea de la muerte. Los varios puntos de observación en el área estaban conectados en la sala de control por medio de la radio y veinte minutos antes el doctor S. K. Allison, de la Universidad de Chicago, había terminado la red radial y hacía anuncios periódicos.

"El tiempo indica «menos 20 minutos, menos 15 minutos» y paulatinamente va creciendo la tensión a medida que se acerca el momento culminante, hasta que el grupo de la sala de control, en el que figuraban el doctor Oppenheimer y el general Farrell, contuvo la respiración, mientras todos hacían votos por el buen resultado del ensayo en medio de la intensidad de aquel momento, que seguramente cada uno de los presentes jamás olvidará mientras viva. A «menos de 45 segundos» el mecanismo robot comenzó a actuar y desde aquel instante se puso en movimiento toda la complicada masa de mecanismos sin control humano. Sin embargo, estaba al lado de un conmutador de desvío un soldado de la ciencia listo para detener la explosión si se hubiera expedido la orden. Esta orden nunca llegó.

"En el momento dado se produjo un relámpago enceguecedor que iluminó toda el área con luz más brillante que la de cualquier día radiante. Una cadena de montañas situada a cinco kilómetros del punto de observación se destacó en

impresionante relieve. Luego llegó un terrible estruendo sostenido y una terrible ola de presión que derribó a dos hombres lanzándolos fuera del centro del control. Inmediatamente después una inmensa nube multicolor se elevaba y ondeaba a una altura de más de 40.000 pies. En su recorrido desaparecían las nubes. Pronto los vientos estratosféricos dispersaron la masa que entonces había tomado un color gris.

"El ensayo estaba terminado; el proyecto era todo un éxito.

"La torre de acero había sido volatilizada por completo. Allí donde se elevaba la torre había un inmenso cráter inclinado. Aturdidos pero alentados por el éxito de sus pruebas, los científicos prontamente unieron sus esfuerzos para medir la potencia de esta nueva arma americana. Para examinar la naturaleza del cráter se acercaron al área tanques especialmente equipados, en uno de los cuales iba Enrico Fermi, el bien conocido físico nuclear. La respuesta a sus descubrimientos se halla en la destrucción efectuada hoy en el Japón en el primer empleo militar de la bomba atómica.

"Si no hubiera sido por la zona desierta en donde se efectuó el ensayo y por la cooperación de la prensa, el ensayo mismo hubiera atraído ciertamente la atención hasta de personas de lugares distantes. Tal como fué realizado, mucha gente en aquella área estaba todavía discutiendo el efecto del destrozo. Un aspecto de significación, recordado por la prensa, fué la experiencia de una muchacha ciega cerca de Albuquerque, a muchos kilómetros del escenario, a quien, cuando el relámpago del ensayo iluminaba el cielo antes de la explosión se la oyó decir «¿Qué es esto?»"

Personas que entrevistaron a los generales Groves y Farrell relatan lo siguiente sobre la escena del ensayo tal como ellos la vieron. El general Groves dijo: "Mis impresiones de los puntos más importantes de la noche son las siguientes: Después de una hora de sueño más o menos me levanté a la 01,00 y desde aquel momento hasta más o menos las cinco estuve constantemente con el doctor Oppenheimer. Naturalmente él estaba dominado por una gran tensión, aunque su mente estaba trabajando con su acostumbrada eficiencia extraordinaria. Gracias a mis razones no se apoderó de él la ansiedad mostrada por muchos de sus asistentes que estaban perturbados por las

inciertas condiciones del tiempo. A las 03,30 decidimos que probablemente podríamos dar la voz de ¡fuego! a las 05,30. Desde las 04,00 la lluvia había parado pero el cielo estaba muy nublado. Nuestra decisión se hizo más firme a medida que el tiempo pasaba.

"Durante la mayor parte de todo este tiempo íbamos desde la casa del control hacia afuera en la oscuridad para mirar a las estrellas y para asegurarnos mutuamente que una o dos de las estrellas visibles se volvían más brillantes. A las 05,10 dejé al doctor Oppenheimer y volví al punto de observación principal que se hallaba a 15.600 metros del punto de explosión. De acuerdo con nuestras órdenes encontré a todo el personal que no estaba ocupado reunido sobre un altozano.

"Dos minutos antes del momento fijado para disparar, todas las personas yacían boca abajo con los pies puestos en dirección de la explosión. Como el tiempo que quedaba era gritado por el locutor desde la estación de control a 9.000 metros, reinaba allí un terrible silencio. El doctor Conant dijo que él nunca hubiera imaginado que los segundos hubieran podido ser tan largos. La mayor parte de las personas de acuerdo con las órdenes dadas se protegieron los ojos de un modo o de otro.

"Primero vimos encenderse una luz de un maravilloso resplandor indescriptible, pues no puedo encontrarle comparación. Todos nos volvimos y miramos a través de anteojos ahumados a la bola de fuego. Más o menos 40 segundos más tarde llegó la ola de choque seguida por el sonido, pero ni la una ni el otro pareció asustarnos después de nuestro completo asombro por la extraordinaria intensidad luminosa.

"Se formó una nube pesada que se agitó y se hinchó como una ola hacia arriba con una tremenda fuerza, alcanzando la substratósfera en 5 minutos más o menos.

"Dos nuevas explosiones de menos efecto, además del relámpago, ocurrieron en la nube poco después de la explosión principal.

"La nube se elevó a una altura primero con la forma de una bola, luego de hongo, luego todavía se convirtió en una larga chimenea en forma de columna y por último fué disper-

sada en muchas direcciones por los vientos variables a distintas alturas.

"El doctor Conant alargó su diestra desde el otro lado y nos estrechamos las manos en señal de mutuas felicitaciones. El doctor Busht que se hallaba también del otro lado hizo lo propio. La sensación de la asamblea entera aun de los no iniciados fué de profundo pavor. Los doctores Conant y Bush y yo mismo estábamos dominados por una sensación aún más fuerte: la fe de aquellos que habían tenido a su cargo el comienzo y la prosecución de este hercúleo proyecto había sido justificada."

Las impresiones del general Farrell son: "La escena en el refugio fué dramática hasta el punto de que no encuentro palabras para describirla. Dentro y alrededor del refugio estaban unas veinte personas extrañas dedicadas a los arreglos de último momento. Se encontraban también el doctor Oppenheimer, el director, quien había asumido la gran tarea científica de desarrollar el arma partiendo de los materiales brutos empleados en Tennessce y Wáshington, y una docena de sus ayudantes principales, el doctor Kistiakowsky, el doctor Bainbridge, quien examinó todos los arreglos detallados para el ensayo; los meteorólogos, y varios otros. Entre éstos se hallaban un puñado de soldados, dos o tres oficiales del ejército y un oficial de la armada. El refugio estaba repleto de una gran variedad de instrumentos y de aparatos de radio.

"No obstante las dos horas algo turbulentas que precedieron la explosión, el general Groves permaneció con el director. Veinte minutos antes de la hora cero el general Groves partió de su estación al campo que servía de base, primero porque proporcionaba un mejor punto de observación y segundo por haber adoptado como norma que él y yo no teníamos que estar juntos en situaciones donde se hallaba un elemento de peligro.

"En seguida, después de la salida del general Groves, empezaron a transmitirse por radio los anuncios en el intervalo de tiempo que quedaba antes de la explosión a los otros grupos que participaban y observaban el ensayo. A medida que el intervalo de tiempo disminuía y cambiaba los minutos en segundos la tensión aumentaba por saltos y brincos. Cada uno en aquella pieza conoció las espantosas potencialidades

de la cosa que ellos pensaban estuviera por acaecer. Los científicos tenían la sensación de que sus cálculos eran acertados y que la bomba tenía que estallar, pero existía en la mente de cada uno una fuerte dosis de duda.

"Estábamos alcanzando lo desconocido y no podíamos saber lo que podía resultar de esto. Se pudo decir con seguridad que la mayor parte de los presentes estaban rogando porque todo saliera bien — y rogando más intensamente de lo que nunca habían hecho antes. Si el proyectil hubiera sido un éxito, habrían quedado justificados los varios años de intenso esfuerzo de decenas de millares de personas, entre ellas hombres de gobierno, científicos, ingenieros, fabricantes, soldados y muchos otros que representaban las más distintas actividades.

"En aquellos breves instantes, en el apartado desierto de Nueva México, el esfuerzo tremendo de los cerebros y de los músculos de toda esta gente llegó repentina y pavorosamente a la máxima tensión. El doctor Oppenheimer, que había tomado sobre sí una muy pesada carga, mostró más ansiedad a medida que se aproximaban los últimos segundos. Apenas respiraba. Se asió a un poste para mantenerse firme. A pesar de faltar sólo pocos segundos, él miraba con fijeza hacia adelante, y luego, cuando el locutor gritó "¡Ahora!" y llegó este tremendo estallido de luz seguido poco después del gran estruendo gruñidor de la explosión, su cara se relajó en una expresión de inmenso alivio. Varios de los observadores que estaban detrás del refugio para observar los efectos de la luz fueron derribados por el sacudimiento.

"La tensión de los que se encontraban en la pieza aumentó y todos empezaron a felicitarse mutuamente. Cada uno se dijo: «¡Lo hemos logrado!» No importa lo que puede ocurrir ahora; todos sabían que la aparentemente imposible tarea científica se había realizado. La fisión atómica no permanecería más tiempo relegada a la región de los sueños de los físicos teóricos. Casi se había asistido a su nacimiento. Existía una gigantesca fuerza nueva para ser empleada por el bien y por el mal, si bien todos anhelaban lo primero.

"El doctor Kistiakowsky estrechó entre sus brazos al doctor Oppenheimer y le expresó sus parabienes con gritos de júbilo. Los demás estaban igualmente entusiasmados. Todas las emo-

ciones contenidas hallaron desahogo en aquellos pocos minutos y todos parecían sentir que la explosión había excedido con mucho las más optimistas expectativas y las más osadas esperanzas de los científicos. Todos parecieron sentir que se hallaban presentes en el nacimiento de una nueva era —La Era de la Energía Atómica— y sintieron su profunda responsabilidad en ayudar a guiar por los justos cauces las fuerzas tremendas que habían sido liberadas por primera vez en la historia.

"En cuanto a la presente guerra, existía el sentimiento de que no importaba lo que además podría ocurrir, sino que nosotros teníamos los medios para asegurar su pronta terminación y salvar millares de vidas americanas. En cuanto al futuro, se presentaba como algo grandioso y algo nuevo, pues aquello llegaría a ser enormemente más importante que el descubrimiento de la electricidad o de cualquier otro descubrimiento trascendental que haya tenido hondo influjo en la vida del hombre."

Los efectos bien podían considerarse sin precedentes, magníficos, espléndidos, estupendos y pavorosos. Ningún fenómeno de tan grande poder realizado por el hombre había ocurrido antes. Los efectos luminosos merecen descripción. La región entera fué iluminada por una luz candente con la intensidad de muchos soles del mediodía. Era de oro, púrpura, violeta, gris y azul. Iluminó cada cumbre, grieta y cima de la cercana cadena de montañas con una claridad y una belleza que no pueden ser descriptas pero pueden ser vistas con la imaginación. Era aquella belleza con que los grandes poetas sueñan pero que describen muy pobre e inadecuadamente. Treinta segundos después, llegó primero la explosión, la ráfaga de aire hizo sentir fuertemente su presión sobre la gente y las cosas, para ser seguida casi inmediatamente después por un fuerte, sostenido y pavoroso estruendo que pareció un anuncio del día del juicio final y nos hizo sentir que éramos cosas culpables por habernos atrevido a liberar las fuerzas hasta ahora reservadas al Todopoderoso. Las palabras son medios inadecuados para informar a aquellos que no presenciaron el ensayo, los efectos físicos, mentales y psicológicos. Hay que haberlo presenciado para apreciar la obra realizada.

Este libro se terminó de imprimir el día 31 de octubre de 1946, en las prensas de **Gerónimo J. Pesce y Cía.**, Pedro Goyena 1562/68, Buenos Aires.